



**Universitat de les Illes Balears**  
Departament de Ciències de la Terra

**ANÀLISI, CARACTERITZACIÓ I DINÀMICA DE LES FORMES  
EROSIVES *BLOWOUT* EN SISTEMES DUNARS DE MALLORCA I  
MENORCA (ILLES BALEARS)**

**Tesi Doctoral**



**Miquel MIR-GUAL**

2014



Universitat de les Illes Balears  
Departament de Ciències de la Terra

**ANÀLISI, CARACTERITZACIÓ I DINÀMICA DE LES FORMES  
EROSIVES *BLOWOUT* EN SISTEMES DUNARS DE MALLORCA I  
MENORCA (ILLES BALEARS)**

**TESI DOCTORAL**

Miquel Mir-Gual

Campanet, 2014





Universitat de les Illes Balears  
Departament de Ciències de la Terra

**ANÀLISI, CARACTERITZACIÓ I DINÀMICA DE LES FORMES  
EROSIVES *BLOWOUT* EN SISTEMES DUNARS DE MALLORCA I  
MENORCA (ILLES BALEARS)**

**TESI DOCTORAL**

Miquel Mir-Gual

El doctorand,

Vist i plau del director,

Dr. Guillem X. Pons

Campanet, 2014



**L'ambició és l'últim refugi del fracàs**  
(*Oscar Wilde*)



## AGRAÏMENTS

Començava els agraïments de la meua Memòria d'Investigació, allà cap a l'any 2011, dient que el camí a seguir per a fer-se amb els somnis personals que es van engendrant en la vida d'un difícilment es pot fer sol. La tesi doctoral que es presenta a continuació esdevé un exemple paradigma del dit. Es correspon, sens dubte, a un somni personal, a un projecte engrescador que vaig decidir començar, vessat d'il·lusió, ara ja fa uns anys. Tanmateix però, cap de les lletres que us trobareu haurien estat possibles sense l'ajuda, el suport, i l'alè de tantes persones que han estat al meu costat al llarg d'aquesta travessia.

Destinar les meves primeres paraules d'agraïment al meu director, el Dr. Guillem X. Pons. Elevar al màxim grau el meu reconeixement cap a ell, per la seva tasca d'assessorament i direcció, per les seves hores de dedicació al treball que present, i sobretot, per la seva qualitat humana. Gràcies a ell la meua formació al llarg d'aquests anys, no sols acadèmica, sinó també humana. Quedi dit per endavant que sense les seves aportacions aquesta tesi perduraria per sempre en el desig. Gràcies de veritat.

En segon lloc, menció de referència als meus pares, Joana i Andreu, per fer de mi qui sóc avui dia. Per dibuixar-me el camí a seguir al llarg de la vida, i pel seu suport sincer i efectiu. Gràcies per aquesta herència. A na Marga, pel seu sofriment i preocupació amb la meua feina, per les seves hores d'escolta i pel suport donat. Per ser la persona que ha estat al meu costat al llarg d'aquest viatge. Al meu germà, Andreu, per esdevenir un referent personal i acadèmic, i per mai deixar de preocupar-se sobre el meu treball. Al meu tio Miquel, referent acadèmic dins la família, per la seva preocupació contínua sobre la nostra formació. I a tota la meua família per extensió. Gràcies.

He tingut la sort de que el suport acadèmic rebut ha comptat amb l'aportació de tantes i tantes persones que, sense cap pretensió ni una, m'han regalat coneixements, ànims, i part del seu temps. Fer menció especial als meus col·legues del grup de recerca BIOGEOMED. Gràcies a Bernadí Gelabert, sempre amb mi, estimulant cada segon de la meua formació acadèmica i personal al llarg d'aquests anys. Un referent sens dubte. A José Ángel Martín-Prieto, per la seva infinita i incalculable ajuda en part del treball, i per la seva inesgotable disponibilitat. A Francesc X. Roig-Munar, per sempre ser una font d'idees, de consells. Per acollir-me a les campanyes de camp a Menorca, per tots els coneixements aportats. I a Antoni Rodríguez, per la sort que he tingut d'encara poder impregnar-me de tots els seus coneixements i consells. Gràcies, de veritat, a tots.

Gràcies a tots els membres del Departament de Ciències de la Terra de la UIB, i en especial a Joan Fornós, Lluís Gómez, Guillem Mateu, Macià Blàzquez, Pere Brunet i Lluís Pomar, que amb les seves distintes aportacions, tant personals com acadèmiques, han fet que la meua experiència hagi estat engrescadora en cada moment. Gràcies.

Endemés fer extensiu l'agraïment acadèmic als companys d'altres universitats que han estat també claus per al desenvolupament d'aquesta tesi. Gràcies de veritat a tots els companys del Grupo de Geografía Física y Medioambiente de l'Universidad de las Palmas de Gran Canaria, en especial a Luís Hernández-Calvento, Laura Cabrera i Natalia Cruz, per acollir-me com a un més i ensenyar-me nous mètodes.

Menció especial, i especialment sentida, a Irene Delgado-Fernández, per acollir-me amb l'amabilitat que la caracteritza i per donar-me l'oportunitat de fer la meua estada pre-doctoral al Geography Department de la Edge Hill University (Anglaterra). Gràcies de tot cor per les seves hores de dedicació, pels seus consells, per l'ajuda en la



revisió de resultats, i per cada segon destinat a mi. Fer extensiu el meu reconeixement a cada un dels membres del Departament, els quals me van fer sentir com a casa.

Gràcies a Thom Smyth, de l'School of the Environment de la Flinders University (Australia), per la seva inestimable ajuda amb els models CFD presentats a la tesi, per la seva titànica humilitat, i per ajudar-me a aprendre i a introduir una metodologia novedosa dins la literatura regional.

Gràcies a n'Aina Sureda, que a més de la seva grandiosa amistat, m'ha regalat part del seu temps i coneixements per a millorar la redacció dels apartats escrits en llengua anglesa. Gràcies de veritat.

Als membres del PN de s'Albufera de Mallorca, especialment al seu tècnic, Biel Perelló, i al seu director, Maties Rebassa. Gràcies també a la Demarcació de Costes de les Illes Balears i a l'Ajuntament de Muro, especialment a Jaume Ramón, tècnic de medi ambient, per sempre facilitar-nos la feina de camp amb les seves autoritzacions.

Milions de gràcies a cada un dels meus amics, i d'aquelles persones que, externes al món acadèmic, sempre m'han donat alè per seguir endavant. Gràcies per les vostres bromes, rialles, incordis plens d'estima, i preocupació. Gràcies en especial a n'Edu, Joan Sebastià, Tòfol Alemany, Jaume Llobina, Isaac Janer, Joan Amengual, Tolo Siquier, Pep Toni, Rafel Pons, Bernat, Martí Plomer, Joan Garau, Antoni Caimari, Pere Reus, Jaume Aguiló, Francesc Aguiló, Enric Jaume, Miquel Torrens, Jaume Ordines, Nofre Mir, Jaume Rayó, i Pau Salort. Gràcies a tots ells i a tots aquells que, tot i no ser a la llista, agrairia que es sentissin igual d'identificats.

Finalment agrair el haver pogut beneficiar-me d'una beca d'investigació FPI atorgada per la Direcció General d'Universitats, Investigació i Transferència de Coneixements del Govern de les Illes Balears, i cofinançada pel Fons Social Europeu, del projecte d'investigació "Litorales carbonatados: morfogénesis endokársitica y registros sedimentarios en relación al clima y evolución del nivel marino cuaternario MICINN CGL2010-18616" liderat pel Dr. Joan Fornós, i de l'ajuda de la Direcció General d'Universitats, Investigació i Transferència de Coneixements del Govern de les Illes Balears per a grups d'investigació competitiu (grup d'investigació BIOGEOMED), amb ajuda del fons FEDER.

A tots i a cada una de les persones citades, i a tots aquells i aquelles que no hi sou però que també heu format part d'aquesta llarga travessia, gràcies, gràcies de tot cor.

# ÍNDIX

Abstract / Resum .....	15
------------------------	----

## CAPÍTOL 1. Introducció, contextualització i marc teòric .....

1.1. Exposició de la problemàtica i hipòtesis de partida .....	19
1.2. Justificació i objectius .....	22
1.3. Antecedents .....	27
1.3.1. Generals de la geomorfologia litoral a les Illes Balears .....	27
1.3.2. L'estudi dels sistemes platja-duna a les Illes Balears .....	29
1.3.3. Els processos erosius als sistemes dunars de les Illes Balears .....	31
1.3.4. L'estudi de les morfologies blowout a escala regional i internacional .....	32
1.4. Configuració de l'espai litoral .....	33
1.5. Caracterització de l'espai litoral .....	44
1.5.1. Els sistemes platja-duna .....	45
1.6. Marc teòric de les morfologies erosives blowout .....	53
1.6.1. Què entenem per blowouts? Definicions .....	53
1.6.2. Gènesis i evolució .....	56
1.6.3. Tipologies i classificació de blowouts .....	62
1.6.4. Implicacions en la dinàmica sedimentària i geoambiental dels sistemes platja-duna .....	64
1.6.. La intervenció en les morfologies blowout com a mesura de gestió .....	69
1.7. La gestió dels sistemes dunars i la primera línia de costa envers a la seva vulnerabilitat. El cas de les Illes Balears .....	73
1.8. El vent: variable atmosfèrica i agent modelador dels ambients litorals sedimentaris .....	77
1.8.1. Interacció entre el flux eòlic i el transport sedimentari en sistemes dunars .....	79
1.8.2. La dinàmica eòlica dins morfologies blowout .....	82
1.8.3. La importància dels fluxos eòlics secundaris .....	84

## CAPÍTOL 2. Justificació de les zones d'estudi i metodologia .....

2.1. Justificació de les zones d'estudi .....	89
2.2. Caracterització de les morfologies blowout .....	91
2.2.1. Selecció i localització de blowouts .....	91
2.2.2. Descripció i caracterització de blowouts .....	94
2.2.2.1. Cartografia de les morfologies blowout .....	97
2.2.2.2. Orientació de les morfologies blowout .....	97
2.2.2.3. Definició i caracterització de les zones degradades (ZD) .....	99
2.2.3. Aixecament de perfils topogràfics interns dins blowouts .....	100

2.2.3.1. Càlcul de pendent i desnivell.....	102
2.2.4. Tractament estadístic.....	103
2.2.4.1. Anàlisi clúster o dendogrames.....	103
2.2.4.2. Anàlisi de Components Principals (ACP).....	105
2.2.5. Classificació de blowouts a partir de la seva forma i estructura.....	106
2.2.6. Aplicació d'índex de relació entre tipologies i variables associades.....	108
2.3. Evolució espacio-temporal de sistemes <i>blowout</i> .....	109
2.4. Dinàmica eòlica i sedimentària.....	113
2.4.1. Plantejament experimental i selecció de blowouts.....	113
2.4.2. Modelització digital del terreny (MDT) dels blowouts.....	115
2.4.3. Caracterització granulomètrica i sedimentària.....	118
2.4.4. Dinàmica eòlica.....	122
2.4.4.1. Experiments i instrumentació.....	122
2.4.4.2. Tractament de dades.....	129
2.4.5. Dinàmica sedimentària.....	132
2.4.5.1. Experiments i instrumentació.....	132
2.4.5.2. Tractament de dades.....	138
2.5. CFD (Computational Fluid Dynamics).....	139

## **CAPÍTOL 3. Caracterització de les formes erosives *blowout* en sistemes dunars de Mallorca i Menorca .....145**

3.1. Mallorca.....	145
3.1.1. Sistema dunar d'es Comú de Muro.....	145
3.1.1.1. Localització i caracterització geogràfica del sistema.....	145
3.1.1.1.1. Sector de dunes davanteres.....	147
3.1.1.1.2. Sector de dunes mòbils o semiestabilitzades.....	148
3.1.1.1.3. Sector de dunes estabilitzades.....	150
3.1.1.1.4. Caracterització climàtica.....	152
3.1.1.2. Les morfologies <i>blowout</i> al sistema d'es Comú de Muro. Resultats.....	153
3.1.1.2.1. Dimensió i gradients de pendent dels <i>blowouts</i> analitzats.....	155
3.1.1.2.2. Orientació dels <i>blowouts</i> .....	158
3.1.1.2.3. Morfometria i topografia interna.....	159
3.1.1.2.4. Caracterització i model evolutiu de zones degradades.....	162
3.1.1.2.5. Classificació morfològica.....	164
3.1.1.2.6. Inventaris florístics i caracterització taxonòmica del front dunar..	168
3.1.1.2.7. Patrons de relació botànica-geomorfològica.....	173

3.1.1.2.8. <i>Caracterització i agrupació integrada dels blowouts</i> .....	176
3.1.2. <i>Sistema dunar de Cala Agulla</i> .....	179
3.1.2.1. <i>Localització i caracterització geogràfica del sistema</i> .....	179
3.1.2.1.1. <i>Sector de dunes davanteres</i> .....	181
3.1.2.1.2. <i>Sector de dunes mòbils o semiestabilitzades</i> .....	182
3.1.2.1.3. <i>Sector de dunes estabilitzades</i> .....	185
3.1.2.1.4. <i>Caracterització climàtica</i> .....	186
3.1.2.2. <i>Les morfologies blowout al sistema de Cala Agulla. Resultats</i> .....	187
3.1.2.2.1. <i>Dimensió i gradients de pendent dels blowouts analitzats</i> .....	188
3.1.2.2.2. <i>Orientació dels blowouts</i> .....	190
3.1.2.2.3. <i>Morfometria i topografia interna</i> .....	191
3.1.2.2.4. <i>Caracterització i model evolutiu de zones degradades</i> .....	194
3.1.2.2.5. <i>Classificació morfològica</i> .....	197
3.1.2.2.6. <i>Inventaris florístics i caracterització taxonòmica del front dunar</i> ..	201
3.1.2.2.7. <i>Patrons de relació botànica-geomorfològica</i> .....	206
3.1.2.2.8. <i>Caracterització i agrupació integrada dels blowouts</i> .....	208
3.1.3. <i>Sistema dunar de Cala Mesquida</i> .....	210
3.1.3.1. <i>Localització i caracterització geogràfica del sistema</i> .....	210
3.1.3.2. <i>Evolució espai-temps del sistema dunar de Cala Mesquida</i> .....	213
3.1.3.2.1. <i>Evolució del front dunar (1956-2010)</i> .....	213
3.1.3.2.2. <i>Variació de la cobertura vegetal (1956-2010)</i> .....	216
3.1.3.2.3. <i>Evolució dels lòbuls (blowouts)</i> .....	219
3.1.3.3. <i>Influència del control estructural sobre el desenvolupament del sistema de dunes</i> .....	223
3.2. <i>Menorca</i> .....	226
3.2.1. <i>Sistema dunar de Cala Tirant</i> .....	226
3.2.1.1. <i>Localització i caracterització geogràfica del sistema</i> .....	226
3.2.1.1.1. <i>Sector de dunes davanteres</i> .....	228
3.2.1.1.2. <i>Sector de dunes mòbils o semiestabilitzades</i> .....	229
3.2.1.1.3. <i>Sector de dunes estabilitzades</i> .....	229
3.2.1.1.4. <i>Caracterització climàtica</i> .....	230
3.2.1.2. <i>Les morfologies blowout al sistema de Cala Tirant. Resultats</i> .....	231
3.2.1.2.1. <i>Dimensió i gradients de pendent dels blowouts analitzats</i> .....	233
3.2.1.2.2. <i>Orientació dels blowouts</i> .....	234
3.2.1.2.3. <i>Morfometria i topografia interna</i> .....	235
3.2.1.2.4. <i>Classificació morfològica</i> .....	236
3.2.1.2.5. <i>Inventaris florístics i caracterització taxonòmica del front dunar</i> ..	239
3.2.1.2.6. <i>Patrons de relació botànica-geomorfològica</i> .....	243

3.2.1.2.7. <i>Caracterització i agrupació integrada dels blowouts</i> .....	245
3.2.2. <i>Sistema dunar de La Vall</i> .....	247
3.2.2.1. <i>Localització i caracterització geogràfica del sistema</i> .....	247
3.2.2.1.1. <i>Sector de dunes mòbils o semiestabilitzades</i> .....	249
3.2.2.1.2. <i>Sector de dunes estabilitzades</i> .....	250
3.2.2.1.3. <i>Caracterització climàtica</i> .....	251
3.2.2.2. <i>Les morfologies blowout al sistema de La Vall. Resultats</i> .....	252
3.2.2.2.1. <i>Dimensió i gradients de pendent dels blowouts analitzats</i> .....	253
3.2.2.2.2. <i>Orientació dels blowouts</i> .....	255
3.2.2.2.3. <i>Morfometria i topografia interna</i> .....	256
3.2.2.2.4. <i>Classificació morfològica</i> .....	258
3.2.2.2.5. <i>Inventaris florístics i caracterització taxonòmica del front dunar</i> ..	260
3.2.2.2.6. <i>Patrons de relació botànica-geomorfològica</i> .....	263
3.2.2.2.7. <i>Caracterització i agrupació integrada dels blowouts</i> .....	265
3.2.3. <i>Sistema dunar de s'Olla</i> .....	266
3.2.3.1. <i>Localització i caracterització geogràfica del sistema</i> .....	266
3.2.3.2. <i>Evolució espai-temps del sistema dunar de s'Olla</i> .....	269
3.2.3.2.1. <i>Evolució del front dunar (1956-2012)</i> .....	269
3.2.3.2.2. <i>Variació de la cobertura vegetal – arbòria – (1956-2012)</i> .....	273
3.2.3.2.3. <i>Evolució dels lòbuls (blowouts)</i> .....	275
3.2.3.3. <i>Influència del control estructural sobre el desenvolupament del sistema de dunes</i> .....	278
<b>CAPÍTOL 4. Dinàmica eòlica i sedimentària</b> .....	<b>283</b>
4.1. <i>Estudi de cas: es Comú de Muro (Mallorca)</i> .....	283
4.1.1. <i>Localització i caracterització física del blowout</i> .....	283
4.1.2. <i>Dinàmica eòlica (situació meteorològica d'estiu)</i> .....	289
4.1.2.1. <i>Velocitat del vent. Dades de màximes i mitjanes</i> .....	289
4.1.2.2. <i>Direcció</i> .....	291
4.1.2.3. <i>Flux eòlic intern</i> .....	295
4.1.2.4. <i>Variabilitat d'intensitat a partir de la variable altura; Fractional speed-up ratio</i> .....	297
4.1.3. <i>Dinàmica sedimentària (situació meteorològica d'estiu)</i> .....	300
4.1.3.1. <i>Transport de sediment</i> .....	300
4.2. <i>Estudi de cas: Cala Tirant (Menorca)</i> .....	304
4.2.1. <i>Localització i caracterització física del blowout</i> .....	304

4.2.2. Dinàmica eòlica (situació meteorològica d'estiu).....	309
4.2.2.1. Velocitat del vent. Dades de màximes i mitjanes.....	309
4.2.2.2. Direcció.....	311
4.2.2.3. Flux eòlic intern.....	314
4.2.2.4. Variabilitat d'intensitat a partir de la variable altura; Fractional speed-up ratio.....	316
4.2.3. Dinàmica eòlica (situació meteorològica d'hivern).....	318
4.2.3.1. Velocitat del vent. Dades de màximes i mitjanes.....	318
4.2.3.2. Direcció.....	320
4.2.3.3. Flux eòlic intern.....	324
4.2.3.4. Variabilitat d'intensitat a partir de la variable altura; Fractional speed-up ratio.....	327
4.2.4. Comparativa de la dinàmica eòlica entre les dues situacions; hivern-estiu.....	329
4.2.5. Dinàmica sedimentària (situació d'estiu).....	332
4.2.5.1. Transport de sediment.....	332
4.2.6. Dinàmica sedimentària (situació d'hivern).....	336
4.2.6.1. Transport de sediment.....	336
4.2.7. Comparativa de la dinàmica sedimentària entre les dues situacions; hivern-estiu ...	343

## **CAPÍTOL 5. Modelitzacions CFD (Computational Fluid Dynamics). Cas d'estudi al blowout de Cala Tirant (Menorca).....347**

5.1. Models sota condicions de baixa energia (estiu).....	348
5.1.1. Vectors, velocitat i línies de flux eòlic incident.....	348
5.2. Models sota condicions d'energia mitjana-alta (hivern).....	354
5.2.1. Vectors, velocitat i línies de flux eòlic incident.....	354
5.3. Anàlisi comparativa entre els models CFD i els experiments de camp.....	361

## **CAPÍTOL 6. Consideracions per a la gestió dels sistemes dunars a partir de la intervenció en blowouts.....369**

6.1. Mesures de gestió generals.....	370
6.2. Mesures de gestió específiques.....	373
6.3. Un exemple de gestió en blowouts. Eficiència o mala praxis?.....	379
6.3.1. Descripció genèrica de la situació actual.....	380
6.3.2. Mesures de gestió ecològiques.....	381
6.3.3. Mesures de gestió geomorfològiques.....	383
6.3.4. Valoració general de l'estat actual.....	386

<b>CAPÍTOL 7. Conclusions</b> .....	<b>391</b>
7.1. Blowouts characterization of dune systems in Mallorca and Menorca .....	391
7.1.1. <i>Es Comú de Muro (Mallorca)</i> .....	391
7.1.2. <i>Cala Agulla (Mallorca)</i> .....	392
7.1.3. <i>Cala Mesquida (Mallorca)</i> .....	393
7.1.4. <i>Cala Tirant (Menorca)</i> .....	394
7.1.5. <i>La Vall (Menorca)</i> .....	395
7.1.6. <i>S'Olla (Menorca)</i> .....	395
7.1.7. <i>Main conclusions</i> .....	396
7.2. Aeolian dynamics and sediment transport.....	397
7.2.1. <i>Es Comú de Muro (Mallorca)</i> .....	397
7.2.2. <i>Cala Tirant (Menorca)</i> .....	398
7.2.2.1. <i>Experiment under low energy</i> .....	398
7.2.2.2. <i>Experiment under medium-high energy</i> .....	400
7.2.3. <i>Main conclusions</i> .....	402
7.3. CFD models .....	403
<b>BIBLIOGRAFIA</b> .....	<b>407</b>
<b>ANNEX</b> .....	<b>423</b>

**ABSTRACT**

Coastal dune systems, according to their physical features, are characterized as highly fragile and dynamics environments. Their formation and evolution mainly depends on the alternation between erosion and sedimentation processes, which will determine their equilibrium. The study of erosion processes has an important role as for the integral knowledge of beach-dune systems, mostly in places such as Balearic Islands where most of its economy develops over coastal areas. The main goal of the dissertation presented is to increase the knowledge about the conservation state of some coastal dune systems located in Mallorca and Menorca (Balearic Islands), and to research into aeolian and sedimentary processes which can explain the erosion mechanisms existing along the first dune which induce, most of the times, to negative balances for the emerged beach. In this sense the presented work aims to carry out an exhaustive analysis of blowouts morphologies located along the first line of the dune systems selected as an study places, understanding that those morphologies can induce to erosion patterns from the upper beach to the inner part of dune complex.

The experimental part of this dissertation is carried out through the dune systems of es Comú de Muro, Cala Agulla and Cala Mesquida (Mallorca), and Cala Tirant, La Vall and s'Olla (Menorca). The work is divided into two different parts. The first one (Chapter 3) has as a main goal to establish an accurate characterization of the blowouts analyzed from their physical perspective. In this sense, the work presents empirical data obtained from some fieldwork campaigns to locate, describe and analyze all those morphologies. A total of 86 blowouts have been studied. The second block (Chapters 4 and 5) presents the most empirical and experimental data of this thesis. Chapter 4 shows the results obtained from 3 different experiments carried out in; one in a blowout located in es Comú de Muro (Mallorca) and, two in a blowout of Cala Tirant dune system (Menorca). In each experiment both blowouts were monitored over 24 h aiming to increase the knowledge about aeolian and sedimentary dynamics given under different energetic conditions. With this purpose 2D anemometers (velocity and direction) were used with a sampling frequency of 1 min. Furthermore, a total of 12 vertical sand traps (Leatherman) were used to calculate the associated transport and sedimentation processes. Chapter 5 presents, for the first time in the Balearic Islands and Spain, CFD (Computational Fluid Dynamics) models simulated above a blowout of Cala Tirant (Menorca). These models have been done using empirical data from field experiments, enabling to compare the results obtained in situ and the ones from mathematics models. In this sense, this thesis aims to introduce, for the first time within the coastal geomorphology discipline to regional and national scale, this methodology as a useful tool for the future of coastal management.

Although coastal dune systems have been highly studied in the Balearic Islands so far, this dissertation is going to be the first reference related to the study of these environments from the geomorphological point of view. From the results and conclusions obtained, this work entails a step forward in the research of the physical features that describe the blowout morphologies in dune systems of the Balearic Islands. Secondly, it supposes a pioneer progress within the knowledge of how aeolian dynamics interferes over the first line of our dune systems, as well as about the associated patterns of sediment transport. All together it allows, for the first time in the Balearic Islands, to know which are the patterns of sediment movement between emerged beach and the innermost part of dune complex, which are the points that enable this transport, when and under which conditions it occurs, and finally, the technical knowledge for



intervening these environments according to optimal management measures, enabling their recuperation.

## **RESUM**

El sistema dunars litorals, d'acord a les seves característiques físiques, es presenten com a ambients molt fràgils i dinàmics. La seva formació i evolució depèn principalment de l'alternança entre processos de sedimentació i erosió, la qual determinarà el seu equilibri. L'estudi dels processos d'erosió té notable importància en tant al coneixement integral del sistema platja-duna, sobretot en ambients com les Illes Balears, a on la major part de la seva activitat econòmica es desenvolupa sobre aquests ambients. La tesi doctoral que es presenta té com a objectiu principal incrementar el coneixement sobre l'estat de conservació d'alguns sistemes dunars localitzats a les illes de Mallorca i Menorca, alhora que investigar sobre els processos eòlics i sedimentaris que poden definir els mecanismes d'erosió al llarg de la primera línia i que condicionen, en molts casos, els balanços sedimentaris negatius per a la platja emergida. Per a tal propòsit es contempla fer una anàlisi i caracterització de les morfologies *blowout* existents al front dunars dels sistemes seleccionats, entenent aquestes com a un dels agents que faciliten els patrons erosius en aquests ambients.

La part experimental del treball està basada en els sistemes d'es Comú de Muro, Cala Agulla, i Cala Mesquida (Mallorca), i Cala Tirant, La Vall, i s'Olla (Menorca). L'estructura de la tesi compta amb dos blocs distints. Un primer bloc (capítol 3) té com a objectiu principal establir una caracterització exhaustiva de les morfologies *blowout* analitzades des del punt de vista físic. En aquest sentit es presenten dades empíriques obtingudes de campanyes de camp realitzades per a localitzar, descriure i analitzar aquestes morfologies des del punt de vista geomorfològic i ecològic. En total s'han caracteritzat un total de 86 morfologies.

El segon bloc (capítols 4 i 5) és el que presenta les dades referents a la part més empírica i experimental de la tesi. El capítol 4 presenta els resultats obtinguts d'un total de 3 campanyes de camp dutes a terme a un *blowout* d'es Comú de Muro (Mallorca), i a un *blowout* localitzat a Cala Tirant (Menorca), basades en el monitoreig al llarg de 24 h per a tal d'incrementar el coneixement sobre la dinàmica eòlica i sedimentària donada en aquests ambients sota distintes condicions energètiques. Per a tal propòsit s'utilitzen sensors de vent 2D (velocitat i direcció) amb una recurrència de mostreig d'1 min, i trampes verticals de sediment (model Leatherman) per a veure els processos de transport i sedimentació associats. El capítol 5 presenta, per primera vegada a les Illes Balears i a l'Estat espanyol, presentant modelitzacions CFD (*Computational Fluid Dynamics*) corregudes sobre el *blowout* de Cala Tirant (Menorca). Les simulacions es fan utilitzant com a referència les dades referents a les condicions energètiques obtingudes en els experiments de camp, ajudant a comparar els resultats obtinguts in situ amb els resultats dels models matemàtics. El propòsit de la tesi en aquest sentit passa per introduir, per primera vegada dins la disciplina de la geomorfologia litoral a nivell regional i nacional, aquesta metodologia com a una eina molt útil per al futur de la gestió d'espais costaners.

Tot i que els sistemes dunars litorals a les Illes Balears han estat vastament estudiats fins al moment, aquesta tesi serà la primera referència sobre un estudi exhaustiu d'aquests ambients des del punt de vista geomorfològic. Dels resultats obtinguts i de les conclusions arribades, aquest treball suposa un avanç en el coneixement de les característiques físiques que defineixen les morfologies *blowout* en sistemes dunars de les Illes Balears. En segon lloc suposa un avanç pioner en el coneixement de com la dinàmica eòlica interfereix sobre la primera línia dels nostres sistemes dunars, així com també dels patrons de transport sedimentari associat. Tot junt permet, per primera vegada a les Illes Balears, conèixer quins són els patrons de transport sedimentari entre la platja emergida i el sistema dunars, quins són els punts que faciliten el transport, quan i sota quines condicions es dona aquest, i finalment, dona els coneixements tècnics per a poder intervenir, a partir de mesures òptimes de gestió, aquests ambients i ajudar-ne a la seva recuperació.

# Capítol 1

---

**Un viatge de deu mil quilòmetres comença per un simple pas**  
*(Proverbi xinès)*

**Introducció, contextualització i marc  
teòric**



**CAPÍTOL 1 \_ INTRODUCCIÓ, CONTEXTUALITZACIÓ I MARC TEÒRIC****1.1 Exposició de la problemàtica i hipòtesis de partida**

La interacció de factors ambientals en l'àmbit costaner determina que en ell s'hi donin lloc un nombre important de processos físics. La conseqüència directe d'aquest fet es tradueix en que la franja litoral sigui considerada avui com una de les zones naturals més fràgils i vulnerables del planeta (Hernández-Calvento, 2002). L'ocupació i assentament de l'activitat humana, i el creixement exponencial d'activitats i usos aliens a aquests emplaçaments han fet que avui, gran part de la zona costanera, principalment les costes baixes sedimentàries, s'hagin vist greument afectades. La pressió incessant per part de l'home sobre el medi natural, notablement palpable en l'àmbit costaner, ha demostrat al llarg del temps que és simptomàtica d'una falta crònica de gestió (OCDE, 1995; Roig-Munar et al., 2009). La pretensió de les societats actuals en comptabilitzar els seus èxits a partir de "*pseudo* mesures monetàries" dificulta de cada vegada més contemplar la realitat natural que ens envolta (Murray, 2005), anant en detriment a la consideració de les seves característiques i potencialitats ambientals i ecològiques.

Les illes de Mallorca i Menorca, tot i que amb intensitats diferents, esdevenen un òptim exemple del dit. El monopoli que la indústria turística ha exercit sobre la franja litoral des de decennis enrere fa, any rere any, que la consideració de l'espai costaner, sobretot d'aquell configurat per sistemes de platja i duna, s'hagi vist notablement afectat i/o alterat. Roig-Munar (2011) esmena que els usos costaners es poden entendre com les activitats que es desenvolupen sobre la franja litoral per al seu ús i explotació tot diferenciant, segons Clark (1996) i Kay i Alder (1999), entre l'ús residencial, l'explotació dels recursos biòtics i abiòtics, les infraestructures, el turisme i les activitats recreatives, i la conservació i la protecció de la biodiversitat. Sigui com sigui, almanco en el cas de les Illes Balears, la sinèrgia entre aquesta diversitat d'usos ha estat la que, al llarg dels anys, i malauradament amb balanç no força positiu, ha incidit amb modificacions substancials sobre la fisonomia litoral.

L'ocupació directa de la costa, endemés dels processos de degradació dels ecosistemes costaners, en moltes ocasions també ha provocat una alteració de la dinàmica litoral, no tan sols en l'àmbit submergit, sinó també en la part emergida del sistema. La nítida evidència, i sobretot les conseqüències que amb el temps han anat sorgint arrel de la degradació i destrucció completa dels sistemes platja-duna ha fet que,

de manera paral·lela, l'interès per entendre millor aquests ambients s'hagi també incrementat. En el cas de les Illes Balears (tal i com es desenvoluparà més extensament als epígrafs 1.3.1., 1.3.2. i 1.3.3.) hi ha hagut un increment exponencial de publicacions i estudis que, des de la vessant científica, s'han dut a terme per tal de millorar el coneixement que fins fa alguns anys es tenia al respecte.

Quan es parla de costa n'és difícil establir-ne uns límits clars, definits, i homogenis. La gran quantitat d'actors i agents biòtics i abiòtics que interactuen en aquesta franja, així com les condicions geològiques i estructurals de cada zona, faran que la configuració de l'espai costaner sigui diferent i, en conseqüència, en variarà la seva tipologia (Davis i Fitzgerald, 2004). De entre el ventall de tipus de costa existents arreu del planeta, en el cas de les Illes Balears en predominen les costes rocoses (erosives) i les costes baixes sedimentàries (deposicionals) (Servera, 2004). A nivell quantitatiu, la primera tipologia és la que hi predomina – e.g. en el cas de Mallorca, segons Balaguer (2007), la longitud total de la línia de costa és de 626 km, dels quals el 81% es correspon a costes rocoses, el 9% a costes baixes i sedimentàries, i el 10% restant a costes manifestament modificades per l'home –. Tot i la importància quantitativa de les costes rocoses vers a les arenoses, aquestes darreres han estat les més alterades i castigades, sobretot, des de l'arribada de l'activitat turística al litoral balear. Les característiques fisiogràfiques d'aquestes costes i les condicions climàtiques de les Balears van suposar que les seves platges i dunes fossin, des dels inicis, un lloc d'experimentació i creixement de la indústria urbano-turística associada.

Els sistemes platja-duna es conformen a partir de la interacció entre dues subunitats principals; la zona submergida, controlada pels processos hidrodinàmics predominants – onatge, corrents litorals –, i la zona emergida, controlada principalment pel vent com agent abiòtic i la vegetació com a factor biòtic. L'increment de l'interès científic a les Illes Balears sobre els processos erosius existents en aquests ambients ha suposat la proliferació de treballs enfocats a trobar-ne les seves causes (Roig-Munar et al., 2009; 2012; Gómez-Pujol, 2013).

D'entre les distintes problemàtiques existents Mir-Gual i Pons (2011) i Mir-Gual et al. (2013) posaren de manifest per primera vegada la problemàtica existent en tant a l'erosió soferta per la primera línia de duna i, en conseqüència, les seves possibles implicacions respecte al funcionament integral de tot el sistema. D'aquestes primeres observacions es tintaren tota una sèrie de consideracions que, com a poc, feien pensar amb la importància que hi havia de mantenir un bon estat de conservació de la primera

línia si el que realment es volia era mantenir un estat òptim pels sistemes platja-duna. Aquesta primera aproximació descriptiva, tot i que verificada per l'aplicació de metodologies quantitatives, posava de manifest la necessitat d'incrementar el coneixement sobre tot un seguit de factors i processos que, segons els autors, podien tenir la resposta al comportament erosiu sofert en aquests ambients.

Així doncs, l'escenari inicialment observat convidava a partir de la hipòtesi de que l'estat de conservació i/o erosió dels fronts dunars jugava un paper clau per entendre els mecanismes erosius i, en conseqüència, els mecanismes evolutius dels sistemes platja-duna des d'un punt de vista integral. Partint d'aquesta premissa, les preguntes que en sorgeixen són tant diverses com recurrents.

Però, què pot incentivar la degradació de la primera línia de duna? Atenent al coneixement científic i al marc teòric ja existent sobre els processos que condicionen aquests espais, endemés de les observacions fetes sobre les distintes zones d'estudi seleccionades, es començà a pensar amb les connotacions que l'existència de formes erosives *blowout* al llarg de la primera línia podien tenir en tant als patrons de transport de sediment des de la platja cap a l'interior del sistema dunar, i per tant, als possibles mecanismes erosius derivats. Tanmateix però, les preguntes seguien sorgint al respecte; són aquestes morfologies naturals, o bé són incentivades per la pressió de l'home? Incideix l'existència de *blowouts* sobre la dinàmica eòlica en els sistemes platja-duna? Condicionen els patrons de dinàmica sedimentària? Tot i que les nombroses preguntes semblaven donar peu a una hipòtesi ferma, es pensava que faltava molt per esbrinar si aquesta era vàlida o no alhora d'explicar-ne la problemàtica en qüestió.

Altres aspectes incitaven a postular-se com a factors claus alhora d'entendre el funcionament d'aquests ambients. Les observacions inicialment fetes per Mir-Gual i Pons (2011) i reafirmades per Mir-Gual et al. (2013) posaven de manifest que la presència o absència de vegetació podia jugar un paper clau en tant al control de la primera línia de dunes, així com també, per què no, de les morfologies erosives *blowout*. No obstant aquesta hipòtesi; amb quin grau la presència/absència de vegetació condiciona l'estat de conservació dels sistemes dunars? Juguen papers diferents la vegetació herbàcia vers a l'arbustiva? Hi ha espècies que tenen un major valor ecològic front a l'estat de conservació dels sistemes? Té la vegetació implicacions vers al règim sedimentari i a la dinàmica eòlica?

Finalment, les condicions estructurals, fisiogràfiques i geològiques de cada un dels sistemes dunars estudiats –fet extrapolable també a la resta de sistemes que avui

encara es troben actius a les Balears – semblaven postular-se també com a agents a tenir en compte pel que fa al funcionament i evolució dels sistemes platja-duna. Les anàlisis fotomètriques van permetre observar que les morfometria dels sistemes dunars i de les morfologies *blowout* divergien en funció del marc estructural a on es localitzaven. És així que la configuració d'aquests ambients en platges més obertes i baixes, e.g. es Comú de Muro (Mallorca) o La Vall (Menorca), sembla divergir de la situació mostrada per cales més encaixades, e.g. Cala Mesquida (Mallorca), o s'Olla (Menorca). Amb aquest sentit doncs, esdevé el control estructural un condicionant pel desenvolupament i caracterització dels sistemes platja-duna?

En resum, les observacions iniciades al camp front al comportament dels sistemes platja-duna en la seva part emergida fan partir de la hipòtesi de que l'estat de conservació de la primera línia és clau per al desenvolupament i conservació integral dels sistemes, i que, qualsevol alteració en ella pot tenir conseqüències negatives per a la totalitat. No obstant, tal i com ja s'han postulat al llarg de les línies anteriors, moltes en són les qüestions que manquen respondre per a verificar tal hipòtesi. D'aquesta manera la tesi doctoral que es presenta s'enfoca i desenvolupa cap a tal propòsit.

## 1.2 Justificació i objectius

Si bé és cert que de forma genèrica l'interès científic a les Illes Balears sobre la franja litoral s'ha incrementat al llarg de les darreres dècades (Gómez-Pujol i Pons, 2007), i que amb bona part aquest ha incidit en l'estudi de les costes baixes arenoses, avui encara queden alguns factors claus per a ser estudiats, i així, seguir incrementant el coneixement sobre la complexitat d'aquests ambients. Les tesis doctorals de Servera (1997) i Roig-Munar (2011) es postulen com a fermes bases per al coneixement, caracterització i classificació dels sistemes platja-duna a les Illes Balears. La primera d'elles s'esdevé com a la base descriptiva i teòrica en tant a la caracterització d'aquests ambients, mentre que la segona, els passa a classificar a partir de criteris i variables enfocades cap a aspectes geomorfològics i de gestió. Amb tot doncs, la visió integral i genèrica dels sistemes dunars a les Illes Balears queda notablement coberta amb aquestes dues obres.

Tot i així, s'ha de tenir en compte que s'està parlant de sistemes molt complexos des d'un punt de vista físic, a on una quantitat notable de factors i agents interactuen sinèrgicament per a derivar-ne amb un important número de processos que, amb el

temps, determinen la seva formació i evolució. Partint d'aquesta complexitat doncs, i de les observacions fetes a l'epígraf anterior, la present tesi es justifica per entrar a filar prim en tant a l'acotament d'alguns d'aquests factors i processos. Les observacions inicials exposades per Mir-Gual i Pons (2011) i Mir-Gual et al. (2013) van incitar a aprofundir sobre l'estudi de l'estat de conservació de la primera línia de dunes, amb expectativa també de donar resposta a les implicacions que aquest podria tenir sobre la integritat del sistema. Aquesta quimera, doncs, és la que estableix la justificació dels aspectes que es pretenen abordar amb la present tesi doctoral: la caracterització i funcionament de les formes erosives *blowout* existents a distints fronts dunars, i les seves implicacions sobre l'estat de conservació dels sistemes platja-duna, a partir de l'estudi de la seva dinàmica eòlica i sedimentaria.

Una vegada les hipòtesis establertes i les preguntes formulades, els objectius del present treball passen per;

- **Objectius generals:**

- Comprendre el funcionament i la dinàmica litoral en costes arenoses. La correcta interpretació i comprensió de cada un dels agents i factors que intervenen sobre l'espai litoral és fonamental a l'hora d'entendre el seu funcionament i comportament, així com també en tant a la capacitat per fer front als dubtes i qüestions que van sorgint en el camí de la investigació. La perceptible simplicitat d'aquest primer objectiu es pot comparar amb la seva imprescindible necessitat a l'hora de dur a terme un treball d'aquestes característiques, ja que serà el que ens construirà les bases per poder dur a terme qualsevol experiment o tasca al camp. Partint d'aquesta reflexió, aquest primer punt serà el que ens farà conèixer quins són els factors implicats i els agents que intervenen en el modelat del litoral a nivell general, les característiques que identifiquen els diferents tipus de costa, la diferenciació entre els agents mecànics – els canvis en el nivell de la mar, l'onatge, els corrents litorals, el vent o la gravetat – , els agents químics, els agents biològics – amb incidència sobre la vegetació–, la importància del tipus de sediment i el seu origen, les modificacions degudes a les pràctiques de caràcter antropogènic, el funcionament dels sistemes platja-duna, les parts els conformen – *nearshore* o platja emergida, *foreshore* o zona intermareal, *backshore* o platja alta –, la



tipologia de dunes i el seu funcionament, o l'evolució dels sistemes dunars, entre altres.

- Anàlitzar el marc teòric de les morfologies *blowout*. Dintre del marc en el que s'engloba el present treball, aquest és sens dubte l'objectiu vertebral el qual posarà les bases per assolir els principals objectius específics (descrits posteriorment). El coneixement a nivell internacional sobre aquestes morfologies és més bé escàs, mentre que en el cas de les Illes Balears és totalment nul fins al moment. Endemés, de les hipòtesis ja exposades anteriorment no tan sols es manifesta l'interès que en pugui tenir el seu estudi a nivell particular, sinó que també, les implicacions que la seva existència o recurrència puguin tenir vers al comportament i la configuració del sistema dunar a nivell integral. D'aquesta manera es pretén establir una base conceptual teòrica que permeti identificar i caracteritzar millor aquestes morfologies.

○ **Objectius específics:**

- Localitzar i cartografiar l'existència de *blowouts* en els diferents casos d'estudi. De l'anàlisi sobre fotografia aèria i el treball *in situ* al camp és té com a objectiu específic inicial establir la primera cartografia acurada de *blowouts* en alguns sistemes de les illes de Mallorca i Menorca, centrant-se amb les zones d'estudi les quals acota la present tesi. Així, es pretén cartografiar l'existència de formes erosives *blowout* al llarg de la primera línia de dunes i establir la base per a la seva posterior anàlisi.

- Conèixer les dimensions i graus de pendent dels *blowouts* cartografiats. Es parteix de la hipòtesi de que les dimensions presentades per cada una de les morfologies pot tenir rellevància a l'hora de condicionar l'estat de conservació de la primera línia de duna. En aquest sentit és té com a objectiu mesurar les dimensions de cada una de les morfologies i d'aquesta manera obtenir-ne informació quantitativa que permeti fer-ne una valoració més empírica.

- Conèixer l'orientació de les morfologies *blowout*. Aquesta és sens dubte també una de les variables que es creu que s'ha de considerar a l'hora de fer una anàlisi completa de les formes *blowout*, i de les seves implicacions sobre l'estat de conservació i evolució dels sistemes dunars. Es pretén doncs mesurar l'orientació de cada un dels *blowouts* analitzats per; a) identificar els patrons que

es puguin seguir en el conjunt dels distints sistemes estudiats, i b) relacionar l'orientació amb la dinàmica eòlica existent i amb les implicacions que en pugui tenir sobre els patrons de transport sedimentari.

- Mesurar la morfometria i topografia interior. Dins del marc teòric fins avui existent a nivell internacional en tant a les formes *blowout* sembla haver aparegut un consens vers a la importància que la topografia interna pot tenir en temes claus tals com el comportament eòlic o els patrons sedimentaris dintre d'aquests ambients (Hesp i Walker, 2012; Smyth et al., 2012). En aquest sentit, el present objectiu passa per a conèixer les característiques topogràfiques internes existents en les unitats d'estudi analitzades, per així obtenir informació quantitativa susceptible de ser posteriorment relacionada amb altres variables.

- Establir patrons d'evolució. En alguns dels sistemes estudiats s'ha observat que no tan sols es poden atribuir els signes erosius a la presència de formes *blowout* simples, sinó que l'evolució i coexistència d'aquestes pot generar zones altament degradades les quals són, avui, les que presenten majors ratios d'erosió i fragmentació. En aquest sentit, es considera clau analitzar aquestes àrees per a incrementar el coneixement sobre el procés evolutiu que pot experimentar una forma erosiva simple, i les seves conseqüències en tant a l'estat de fragmentació dels sistemes dunars.

- Caracteritzar i classificar morfològicament les formes erosives existents en primera línia. Alguns autors tals com Cooper (1958) o Hesp (2002) estableixen una classificació de *blowouts* en funció de la forma presentada. Si bé és cert que hi ha també altres classificacions més categòriques, sembla ser que les referències esmentades són les que més èxit han tingut dins l'actual marc científic, pot ser per la seva simplicitat i objectivitat. No obstant, tot i partint d'aquestes classificacions ja existents com a base, un dels objectius de la present tesi passa per a catalogar i classificar les formes analitzades. Aquesta classificació es pretén dur a terme; a) a partir d'una anàlisi fotomètrica visual, i b) a partir d'una anàlisi quantitativa – emprant la informació extreta dels perfils topogràfics interiors realitzats – que ens permeti corroborar empíricament la classificació visual.

- Conèixer les implicacions i la relació existent entre morfologies *blowout* i vegetació. És sabut que, dintre del comportament i evolució dels sistemes dunars, la vegetació, junt amb altres agents tals com la quantitat de sediment i el

vent, és un dels factors que més importància té. Amb aquest sentit es postula com un objectiu primordial conèixer quina és la situació d'aquesta variable a les zones d'estudi. Per això s'estableix com a pauta a realitzar inventaris florístics per a cada un dels *blowouts* analitzats en les distintes zones d'estudi, diferenciant entre vegetació herbàcia i vegetació llenyosa o arbustiva. Amb tot, es té per objecte també establir patrons d'associació entre les espècies identificades i així, comprovar si existeixen col·lectius que presenten un major pes en tant a l'estat de conservació de la primera línia dunar. Endemés, es pretenen dur a terme anàlisis que ens permetin verificar o descartar si existeix una relació empírica entre vegetació i tipologia de *blowouts*. Finalment, alguns estudis recents suggereixen la importància que la vegetació pot tenir en tant als patrons de transport sedimentari entre la platja alta i l'interior del sistema dunar.

- Estudiar i comprendre la dinàmica eòlica en morfologies *blowout*. El vent s'estableix com un dels principals agents mecànics a considerar quan parlem del modelat, configuració i evolució en ambients sedimentaris costaners. No obstant, i sota determinades condicions, el vent, a part d'un agent modelitzador també es pot postular com a un agent erosiu, fet que pot tenir conseqüències, algunes vegades negatives, per a un balanç sedimentari òptim. L'existència de vents importants corresposta per la presència de *blowouts* en la primera línia de dunes pot conjugar un exemple paradigma d'aquestes situacions erosives. Partint d'aquesta premissa es postula com un objectiu ferm i important el conèixer quina és la dinàmica eòlica una vegada el vent arribar als *blowouts*, i quines implicacions té aquesta amb altres variables tals com el control de la topografia, o l'existència de vegetació.

- Conèixer i analitzar els patrons en el transport sedimentari. Íntimament relacionat amb l'objectiu anterior, és primordial conèixer i entendre millor quines són les pautes amb que el sediment és transportat des de la platja alta cap a l'interior del sistema dunar. Amb aquest sentit és sabut que els agents necessaris en són l'existència de sediment disponible per a ser mogut, i la presència de vents efectius. No obstant encara manca millorar el coneixement sobre les condicions necessàries per a que aquest transport es dugui a terme. Així doncs, i havent analitzat abans factors tals com la morfologia i la topografia dels *blowouts*, i el comportament del flux eòlic en el seu interior, es postula com

a clau estudiar els patrons de transport sedimentari produïts sota certes condicions ambientals i climatològiques – energètiques –.

- Conèixer les implicacions de la dinàmica eòlica i sedimentària de *blowouts* sobre la resta del sistema platja-duna. És sabut i demostrat científicament que aquests són sistemes altament fràgils, canviants i dinàmics. Aquest dinamisme fa que la modificació de qualsevol de les parts que formen la integritat del sistema pot tenir un efecte sinèrgic sobre el seu conjunt. Dintre d'aquest mosaic cal tenir esment especial a l'estat de conservació de la primera línia de dunes, ja que aquestes, per les seves característiques, presenten encara un paper important en tant al dinamisme sedimentari del sistema. Partint d'aquesta premissa, i aprofitant el compliment dels objectius anteriors, es té per objecte conèixer les implicacions que l'existència de *blowouts* pot tenir en tant a l'estat de conservació i/o degradació dels sistemes dunars, sen considerats aquests com a hàbitats prioritaris per a la seva conservació (Directiva Hàbitats).

- Considerar mesures de gestió blanques i sostenibles per a millorar l'estat dels fronts dunars a les Illes Balears. Una vegada establerta la part descriptiva i empírica la qual ens permet entendre millor les conseqüències que els *blowouts* tenen en els sistemes platja-duna, es pren com a objectiu final establir tota una sèrie de consideracions que, partint de la realitat mostrada empírica i quantitativament, puguin ajudar a pal·liar els possibles efectes erosius que aquestes morfologies en puguin derivar.

### 1.3 Antecedents

#### 1.3.1. Generals de la Geomorfologia Litoral a les Illes Balears

Segurament ningú discrepi a l'hora d'afirmar que l'espai litoral, sobretot en espais com les Illes Balears, esdevé com emplaçament estratègic i de base per a l'activitat econòmica regional. No obstant, aquesta és una percepció relativament moderna, ja que curiosament, abans de l'anomenada *Industria de los forasteros* (Amengual, 1903) aquest quedava en un segon pla enfront als pintorescos i actius paisatges de la Serra de Tramuntana (Gómez Pujol i Pons, 2007), i la productiva zona agrícola de l'interior.

És a mitjans del segle passat però, quant l'activitat antròpica comença, pels seus propis interessos, a pitjar fort sobre l'espai litoral tot desenvolupant-hi una estructura

social de cada cop més complexa. Aquest interès envers les nostres costes no va deixar indiferent la vessant científica i acadèmica, incrementant exponencialment la seva curolla per l'estudi i caracterització d'aquests ambients. Així, des dels primers articles redactats pels il·lustres visitants de finals del segle XIX, passant per obres com la d'Amengual (1903), les referències bibliogràfiques vers al litoral illenc no han fet més que créixer, tendint a ser de cada cop més específiques i sobre temàtiques diverses, explicant alhora el vast coneixement que avui dia tenim sobre l'espai litoral.

En el marc geogràfic de les Illes Balears, amb incidència sobre el cas de Mallorca i Menorca, el coneixement científic de les nostres costes és considerable i dilatat en el temps (Balaguer, 2002; Gómez Pujol i Pons, 2007). Tot i que des del punt de vista geològic i geomorfològic se'n troben una bona pila de publicacions, la vessant socio – econòmica i, més recentment, la de gestió, també han anat agafant força dins l'escenari de l'estudi costaner (Roig-Munar et al., 2009). La complexa configuració del litoral es treu a debat en cada un dels camps d'estudi dels especialistes que treballen en geomorfologia litoral, entenent aquesta com la disciplina que s'interessa en esbrinar i explicar la formació i evolució del relleu costaner a partir de l'estudi de les formes, agents, i processos que tenen lloc a la línia de costa (Gómez Pujol i Pons, 2007), i darrerament també, amb l'estudi sobre els canvis geomorfològics provocats per l'acció antròpica (Martín-Prieto et al., 2010; Mir-Gual et al., 2010).

En el cas de Mallorca tres o quatre en són les etapes que es poden diferenciar d'una forma més o menys clara pel que fa referència a l'estudi de la seva costa, deixant de banda les descripcions, intuïcions i tòpics dels viatgers i particulars o historiadors del segle XVIII (Gómez Pujol i Pons, 2007). La primera de les etapes es podria associar a les contribucions de les memòries que ens van deixar alguns dels viatgers il·lustres del XIX. Aquestes obres, de caràcter bàsicament descriptiu, vénen seguides per les investigacions de la segona meitat del segle XX, encapçalades pel paleontòleg i naturalista català Joan Cuerda (Barcelona, 1912 – Palma de Mallorca, 2003) i el professor alemany Karl W. Butzer (Alemanya, 1934). Els dos van dur a terme una interessant i no manco intensiva tasca d'investigació, sempre contribuint en el coneixement de la costa balear, aportant importants contribucions sobre els efectes del Quaternari. El professor Vicenç M. Rosselló Verger (Palma, 1931), des de la Universitat de València, va dirigir, seguint amb la tendència del seus antecessors, una ferma línia de treball consolidada en el camp de la geomorfologia litoral. El darrer període, segons Gómez-Pujol i Pons (2007) es correspon amb la consolidació de la

Universitat de les Illes Balears i el seu Departament de Ciències de la Terra, així com altres institucions acadèmiques tals com l'Institut Mediterrani d'Estudis Avançats CSIC-UIB (IMEDEA), o bé el treball de tècnics en administracions autonòmiques, insulars i/o locals. Aquesta doncs, i lluny de voler oblidar les contribucions de particulars anònims – moltes vegades a través de treballs inèdits –, és la seqüència que estructura el devenir del coneixement que tenim sobre la franja litoral avui dia. Recentment, Fornós et al. (2007) amb la monografia *Geomorfologia Litoral. Migjorn i Llevant de Mallorca*, i Pons i Vicens (2007) amb *Geomorfologia Litoral i Quaternari* estableixen una detallada representació dels coneixements actuals que avui en dia es tenen del litoral mallorquí des del punt de vista físic, referint-se també a la seva gestió.

### 1.3.2. L'estudi dels sistemes platja-duna a les Illes Balears

Des de finals de la dècada dels 90 del segle passat l'estudi i l'increment del coneixement científic sobre els sistemes platja-duna a les Illes Balears ha sofert un creixement notablement considerable. A nivell jeràrquic destacar-ne dues obres de referència les quals, de manera extensa han assentat, i alhora representat, les bases i l'evolució de dit coneixement. Així doncs, Servera (1997) defensà la seva tesi doctoral sota el títol *Els sistemes dunars litorals de les Illes Balears*, la qual establia una profunda base descriptiva en tant a la caracterització física de tots els sistemes dunars actius existents arreu de l'arxipèlag. Anys més tard, Roig-Munar (2011), amb la tesi doctoral *Aplicació de criteris geomorfològics en la gestió dels sistemes litorals arenosos de les Illes Balears* anava una mica més enllà de la base estrictament descriptiva, tractant des d'un punt de vista més científic l'evolució soferta pels sistemes dunars balears a partir de la seva visió més física i geomorfològica, al temps que indagava en establir criteris tècnics per a la seva correcta i sostenible gestió. Precisament, aquests dos autors són els que, al llarg del darrers lustres, han encapçalat més estudis vers al tractament dels sistemes platja-duna a les Balears com a nou punt calent d'estudi.

Una de les obres de base a considerar pel que fa a la gestió dels sistemes platja-duna a les Illes Balears fou l'obra de Rodríguez-Perea et al. (2000), sota el títol *Alternatives a la dependència de les platges de les Balears de la regeneració artificial continuada: informe Metadona*, la qual es postula com a la primera cita que fa una crida d'atenció a la necessitat de mesures blanques i sostenibles per a la gestió d'aquests

ambients. Anys més tard, Servera (2004) incrementa la divulgació i coneixement d'aquests ambients amb la seva obra *Geomorfologia Litoral de les Illes Balears*, el qual de manera sintètica en destaca els seus trets fisiogràfics.

D'altra banda varis capítols de llibre han estat centrats amb tal fi. Servera (2003) feia un repàs descriptiu als sistemes platja-duna holocens a l'illa de Menorca, mentre que Servera (2003a) es centrava única i exclusivament amb la descripció del sistema dunar de Cala Tirant, localitzat també al nord de Menorca. Un anys més tard Servera i Riquelme (2004) es centraven en la caracterització del vent com a agent modificador dels sistemes de dunes litorals actuals. Al monogràfic *Geomorfologia Litoral. Migjorn i Llevant de Mallorca* (Fornós et al. 2007) varies en són les contribucions referides als sistemes dunars balears. Servera et al. (2007) centra la seva primeta aportació a la caracterització física dels sistemes platja-duna a les Illes Balears, mentre que Servera et al. (2007a) fa èmfasi específic al cas d'es Trenc, Mallorca. D'altra banda, Martín-Prieto et al. (2007) postula l'estat de la qüestió referent a la gestió litoral a les Illes Balears, mentre que Martín-Prieto et al. (2007a) es centra en el cas específic del sistema de s'Amarador, també a Mallorca. Més recentment, al monogràfic sota el títol *Las dunas en España* (Sanjaume i Gracia, 2011) Roig-Munar et al. (2011) parlen sobre les alternatives ambientals en la gestió de platges i sistemes dunars a les Illes Balears, tema posteriorment també tractat dintre del monogràfic *La gestión integrada de playas y dunas: experiencias en Latinoamérica y Europa* (Rodríguez-Perea et al., 2012) per Roig-Munar et al. (2012).

Si la contribució, bé en obres completes o bé en capítols de llibre, ha estat vasta, la proliferació d'articles en revistes científiques – nacionals i internacionals – ha estat més que considerable. A nivell nacional, el *Boll. Soc. Hist. Nat. de Balears* ha estat sens dubte la plataforma que més articles al respecte ha publicat. Per una banda han sortit articles referents a la descripció específica sobre varis sistemes platja-duna arreu de les Illes (e.g. Roig-Munar et al. 2007; 2008; 2008a; 2009a; 2009b, Mir-Gual et al. 2011, Martín-Prieto et al. 2011). Endemés, hi ha altres exemples sobre descripcions centrades en un únic sistema entre les que destaquen Martín-Prieto et al. (2007) o Mir-Gual (2009).

D'altra banda, i ja a nivell més genèric Roig-Munar et al. (2009c) i Mir-Gual et al. (2010) fan referència als processos de fixació i reforestació als que alguns sistemes de Menorca, en el primer cas, i Mallorca en el segon, s'han vist sotmesos històricament. Roig-Munar et al. (2006) estableix una anàlisi espai-temps (1956-2004) dels sistemes

dunars a l'illa de Menorca, treball que incrementa i millora amb Roig-Munar et al. (2012). Tots aquests anys d'estudis diversos i experiència sobre els sistemes dunars a les Illes Balears, contrarestant el dinamisme implícit d'aquests ambients amb la seva modificació a causa de l'home, dugueren a que Roig-Munar et al. (2009) contribuïssin amb una aportació centrada en defensar les mesures blanques de gestió per aconseguir una millora envers a l'estat de conservació dels sistemes platja-duna.

### 1.3.3. Els processos erosius als sistemes dunars de les Illes Balears

Si bé des d'un prisma genèric el coneixement i la proliferació científica sobre els sistemes litorals arenosos a les Illes Balears ha estat notable al llarg de les darreres dècades, les referències basades única i exclusivament amb els processos erosius no són tant abundants. Cap afegir també que, fins al moment, no hi ha hagut cap línia centrada en estudiar de manera específica cap procés erosiu, ni tampoc la incidència d'aquests sobre alguna unitat concreta dins la integritat dels sistemes platja-duna. No obstant, al llarg dels darrers temps han sortit algunes referències disperses referents a l'estat, o bé a processos erosius incidents sobre els sistemes dunars a les Illes Balears.

En aquesta tessitura Roig-Munar (2004) publicava un interessant article el qual es centrava a analitzar els efectes erosius derivats de la neteja de platges a partir de la utilització de maquinària pesant. A més de quantificar els processos erosius derivats justificant-los amb la modificació dels perfils naturals de platja, també establí una comparació per veure quina era la maquinària que manco impacte tenia. Al mateix any, Roig-Munar et al. (2004) contribuïen amb la quantificació de les pèrdues sedimentàries provocades pels usuaris en algunes platges de l'illa de Menorca.

El paper de les banquetes de *Posidonia oceanica* com a agent protector de la platja alta i per tant, del sistema en general, també ha estat tractat en els darrers anys. Autors com Rodríguez-Perea et al. (2000), Roig-Munar i Martín-Prieto (2003; 2005) i Servera (2004), a partir dels coneixements promulgats anteriorment per alguns autors francesos tals com Boudouresque i Meinesz (1982), posaven de manifest el rol protector que jugava la posidònia en tant a la integritat sedimentària de les nostres platges. Aquesta ha estat la teoria que ha imperat fins a dia d'avui, moment en que altres autors com Gómez-Pujol et al. (2013) suggereixen que aquesta percepció hauria de ser revisada, posant en dubte alhora la magnitud d'aquesta funció protectora.



Un altre dels temes estudiats referents a l'estat erosiu dels sistemes platja-duna n'ha estat l'avaluació del retrocés de la línia de costa, principalment atribuït a factors antropogènics. Dintre d'aquesta línia Martín-Prieto et al. (2010) feien esment al cas concret succeït a la platja d'es Trenc, Mallorca, mentre que Roig-Munar et al. (2012) incrementaven l'anàlisi afegint els casos de Cala Mesquida (Mallorca), i Son Bou i s'Olla (Menorca).

#### 1.3.4. L'estudi de les morfologies *blowout* a escala regional i internacional

L'estudi de les morfologies *blowout* a les Illes Balears és tant escàs com recent. De fet, les poques referències existents avui dia en el sí de la bibliografia científica centrades amb l'existència d'aquestes morfologies en sistemes dunars de les nostres illes, estan íntimament relacionades amb la tesi doctoral que es presenta. Mir-Gual et al. (2011) estableixen una primera caracterització del sistema dunar d'es Comú de Muro, Mallorca, on citen per primer cop l'existència d'aquestes morfologies. Al mateix any, Mir-Gual i Pons (2011) i Mir Gual et al. (2011) es centren més concretament amb l'estat de fragmentació del mateix sistema dunar, incidint i justificant-ho a partir de la presència d'una gran nombre de *blowouts* al llarg del seu front. L'avaluació de l'estat de fragmentació d'es Comú de Muro queda completada amb la publicació d'un article de més impacte, a on, amb un anàlisi més quantitatiu i empíric, Mir-Gual et al. (2013) conclouen amb la relació directa entre presència de *blowouts* i estat de fragmentació del sistema.

Dintre de la mateixa línia Mir-Gual et al. (2012) contribuïen també amb un estudi sobre la presència de *blowouts* en el sistema de Cala Agulla, Mallorca, tot relacionant la seva recurrència amb el grau de fragmentació i erosió presentat.

L'estudi de *blowouts* tampoc és molt dilatat en el temps a nivell internacional, sobretot si es compara amb altres agents, factors o morfologies que si han tengut un major i estès interès científic. No obstant sembla ser que des d'algunes dècades enrere hi ha hagut un increment força interessant en tant a l'estudi d'aquestes morfologies, i sobretot amb el fet de relacionar-les amb el funcionament integral dels sistemes platja-duna. No és objecte per la present tasca fer un relat exhaustiu de totes les referències existents a dia d'avui, sinó tan sols, i des del coneixement, esmentar-ne algunes. Amb aquest propòsit doncs, i a grans trets, dos en serien els grups a diferenciar. En primer lloc aquell format per treballs destinats a posar les bases teòriques i descriptives

(Patriquin, 1975; Jungerius i Verheggen, 1981; Flor, 1984; Jungerius, 1984; De van Ancker i Jungerius, 1985; Bate i Ferguson, 1996; Hesp, 2002; Hesp and Walker, 2013). En segon lloc, es podrien destacar aquells basats amb l'estudi de la dinàmica eòlica i sedimentaria, i de les seves implicacions en el funcionament del sistema (Jungerius, 1984; Gares, 1992; Gares i Nordstrom, 1995; Hesp, 1996; Hesp i Hyde, 1996; Jungerius i van der Meulen, 1997; Dech et al. 2005; Hugenholtz i Wolfe, 2009; González et al. 2011; Smyth et al., 2011, 2012; Hesp i Walker, 2012; Barchyn i Hugenholtz, 2012, 2013; Walker i Hesp, 2013).

#### **1.4. Configuració de l'espai litoral**

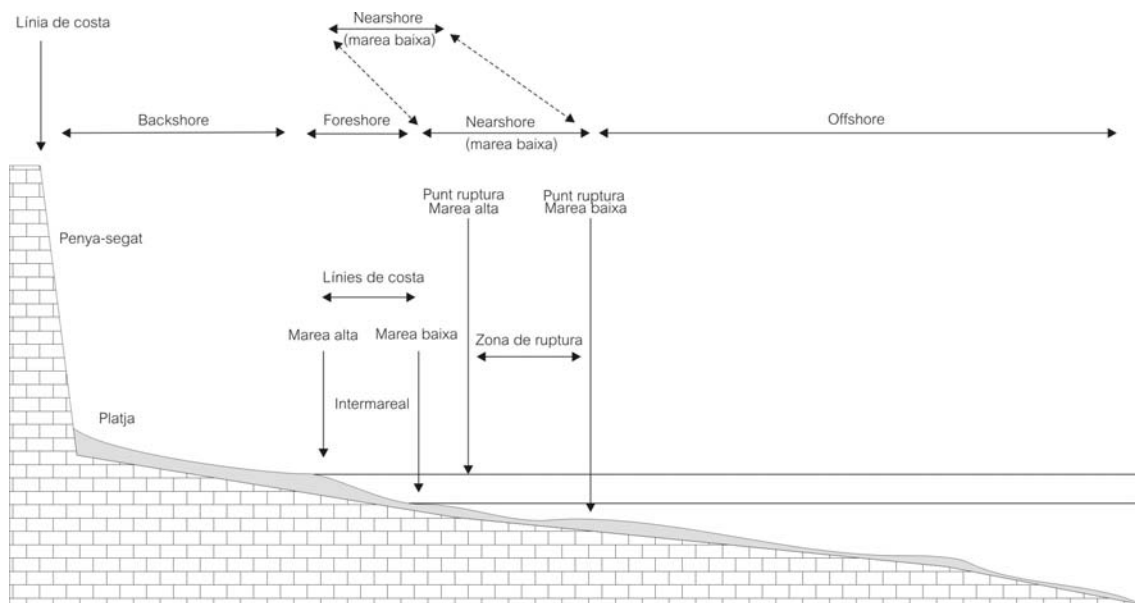
En una primera aproximació geogràfica, el litoral és un espai al voltant de la línia de costa, zona de contacte entre mar i terra, frontera entre dos medis diferents, i per tant, àrea d'interrelació. No obstant, i a diferència d'altres, aquest és un espai que, semànticament parlant, es caracteritza per la seva imprecisió, ja que coexisteixen un conjunt de vocables que, amb igual generalitat, fan referència al mateix àmbit, tals com litoral, costa, ribera, etc. (Suarez de Vivero, 1997). A part de la seva vulnerabilitat a l'hora de ser definit, una de les peculiaritats més importants és que esdevé un espai dinàmic, constituint coetàniament un territori que constantment s'està transformant. Amb el pas de les dècades, aquest ha anat evolucionant cap a un espai de base i de confluència entre diferents activitats socio-econòmiques i humanes, lloc on es localitzen rellevants concentracions demogràfiques i industrials i, des dels temps més contemporanis, és també un indret que es transforma i s'adapta en funció de les estructures urbanes i productives. A mode d'exemple, en casos com el de Balears, des de l'explosió turística a meitats del segle XX, les activitats recreatives i d'oci a la zona costanera no han deixat d'augmentar exponencialment, suposant paral·lelament un increment de les infraestructures associades. A més, altres activitats tradicionals com la pesca, han seguit el seu camí influint també sobre els ecosistemes marins. Tot plegat ha generat, sens dubte, una força amb capacitat de condicionar la zona costanera actual (Blázquez, 1998).

Amb tot, és difícil trobar una definició única de litoral o zona costanera, i que a la vegada sigui aplicable de forma satisfactòria per a les diferents disciplines. Més complicat és encara però, tractar de delimitar aquest espai en criteris tècnics i científics vàlids per a l'ordenació del territori. Ens referim al seu caire jurídic, establert per la Llei

de Costes 22/1988, de 28 de juliol, recentment suplerta per la Llei 2/2013, i on no es proporciona una definició del què és i suposa l'espai litoral, sinó que tan sols es limita a establir referències a l'hora de delimitar el domini públic marítim (Mir-Gual et al., 2012b)

Possiblement, tal i com postulen alguns autors (Nordstrom, 2000), la manera més objectiva de traçar aquesta definició seria tractant factors físics i humans empíricament apreciables, i que tinguin relació directa amb aquest espai.

Autors com Bird (2008) creuen que l'espai litoral és aquella franja a la qual hi arriba la influència de la terra i de la mar. No obstant, aquesta afirmació es podria vulnerar, sobretot a l'hora de definir fins on arriba exactament cada una de les influències esmentades, amb èmfasi sobre fins on s'estén la terrestre dins la mar. D'aquesta idea n'han sortit representacions gràfiques les quals ja han utilitzat els paràmetres físics com a definidors de l'espai litoral i de la seva zonificació interna (Figura 1).



**Figura 1:** Esquema general de l'espai litoral i de la seva sectorització a partir de criteris físics. Reproduït de Bird (2008).

Al parlar de la costa no ens hi podem referir des d'un punt de vista simple ni homogeni. La seva caracterització hauria d'anar molt més enllà de les característiques intrínseques de cada emplaçament. Les peculiaritats de l'entorn a una major escala i les forces i els processos que hi actuen en seran imprescindibles si volem conèixer qualsevol indret litoral des d'un prisma transversal (Pethick, 2001). El diferent context

geogràfic i la diferència d'intensitat en que els distints agents físics (Taula 1) hi actuïn derivaran en l'existència de distints tipus de costa arreu (Figura 2). Així diferenciarem les costes altes, amb presència de penya-segats i importants mecanismes d'erosió, i d'altra banda les costes baixes, caracteritzades per ocupar zones deprimides amb processos intensos de sedimentació.

AGENTS FÍSICS	AGENTS ANTRÒPICS
Vent	Pressió urbanística
Onatge	Sobreocupació d'usuaris
Corrents marines	Pràctica abusiva d'activitats
Marees	Tècniques de gestió aplicades
Tipus de sediment	Manca de polítiques de gestió
Font del sediment	Manca d'eficiència de la legislació
Vegetació (aèria i marina)	Feble conscienciació

**Taula 1:** Agents físics i antròpics que afecten a la formació, evolució i caracterització de l'espai litoral.

No es poden obviar tampoc els canvis eustàtics, és a dir, els relacionats amb els canvis generals del nivell del mar, causats bé per deformacions de les cubetes oceàniques que modifiquen la seva capacitat, o bé per les variacions del volum dels oceans i mars a causa de la formació i fusió dels glaciars al llarg del Quaternari (Nonn, 1987). Els moviments orogènics, tectònics, o isostàtics, paleorègims de vents i corrents, i dades paleoclimàtiques que hagin afectat al llarg de la història geològica a les masses continentals, també són un dels factors que han influenciat amb la fisonomia i diferenciació de les costes actuals.

Les costes sedimentàries són les més vulnerables a l'hora de ser modificades, sigui per condicions i comportaments naturals, o bé per l'acció de l'home (Davis i Fitzgerald, 2004). No obstant, el fet més determinant és la quantitat d'energia que reben, i en conseqüència, la intensitat de la seva dinàmica litoral (Servera, 2004). En el cas del litoral de la Mediterrània nord-occidental, els agents dinàmics que influencien més en l'evolució del litoral són l'onatge, la deriva litoral, el vent, les seques i els corrents marins. S'ha de tenir en compte que la influència de les marees és pràcticament nul·la, i que els efectes que ocasiona aquest fenomen sobre la costa, a la llarga, són més bé insignificants (Viñals, 1999). Si bé aquestes no tenen un efecte gaire significatiu en el cas de la Mediterrània – degudes les seves condicions micromareals –, tot just amb una amplitud màxima de 25 centímetres, sí que es poden apreciar sobretot als mesos d'estiu,

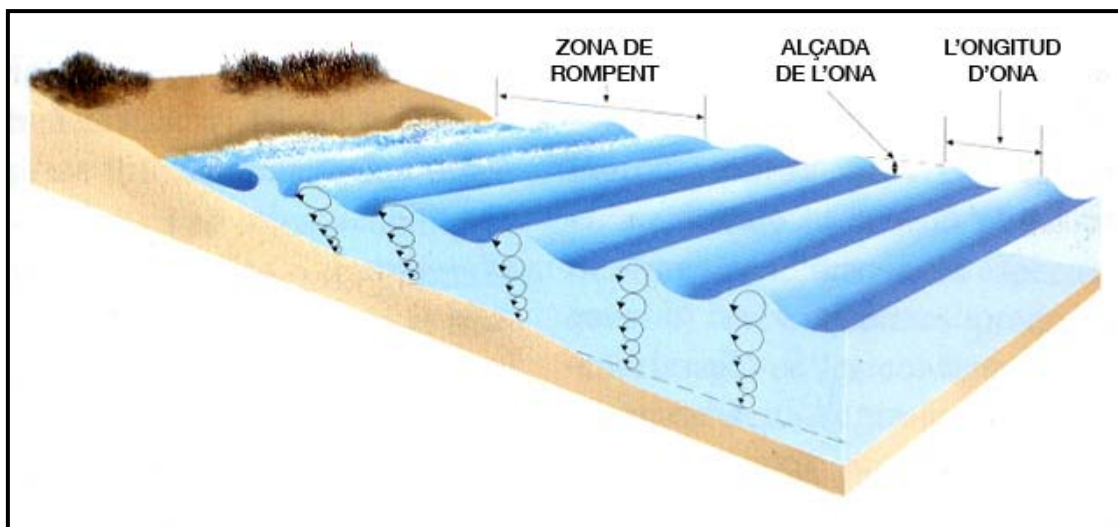
amb un període d'uns quants minuts (Ojeda et al. 2009). A més, en determinades condicions meteorològiques es poden donar variacions del nivell de la mar a causa de canvis substancials en la pressió atmosfèrica (Ramírez i Candela, 2003). Paral·lelament hi ha altres agents que, en casos específics, poden jugar un paper important, com és el cas de les ones llargues.



**Figura 2:** Les característiques físiques de cada ambient, així com la magnitud d'incidència de cada un dels agents que intervenen en els processos litorals (Taula 1) determinen diferents tipus de costa (Mir-Gual, 2011).

Per les condicions de la conca mediterrània i les característiques de la mar, amb l'absència ja comentada de mareas, l'agent mecànic que més importància té sobre la configuració del litoral sedimentari en són les onades (Figura 3). És cert que el poder erosiu d'aquestes s'exerceix en tot tipus de costa, però en especial actua sobre les costes deprimides i amb deposició sedimentària, on l'efecte sobre els materials no consolidats (arena, còdols, fangs, etc.) és superior que el que es dona sobre un penya-segat. L'onatge es genera per la transferència d'energia del vent sobre la superfície d'aigua de la mar. Com que el Mediterrani és un mar tancat i petit, i en el nostre cas, la superfície de mar disponible per la generació d'onatge (*fetch*) també és limitada, les onades generades són, majoritàriament, de període curt, les quals es mouen més poc a poc i

conseqüentment perden més energia a mesura que es dirigeixen cap a la primera línia de costa (Pethick, 2001).

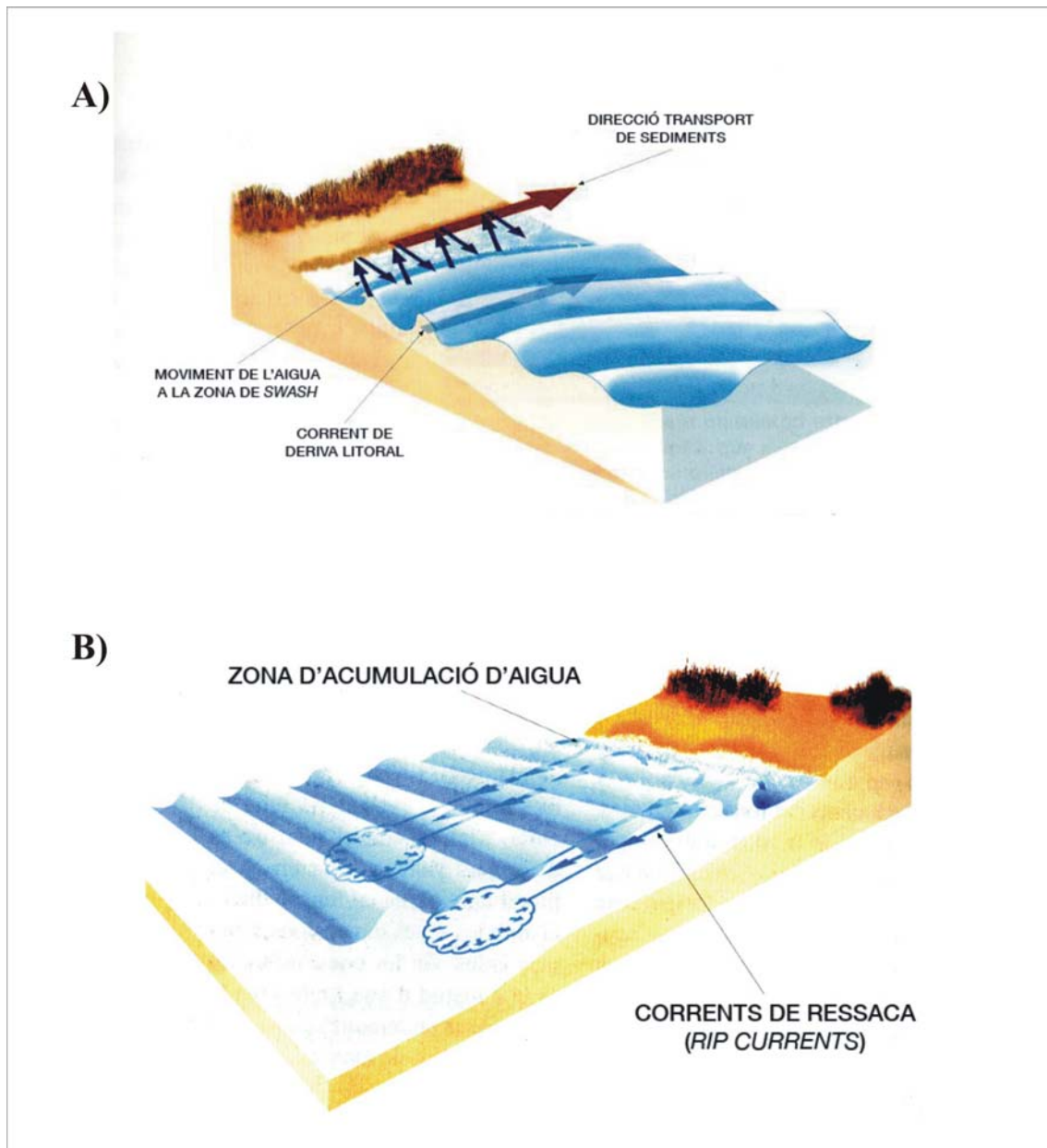


**Figura 3:** Esquema representatiu de la formació i evolució de l'onatge fins a la zona de trencament. Modificat de Servera (2004).

L'efecte de l'onatge sobre el litoral té dos aspectes importants a considerar: a) remoure i posar en suspensió el material que el constitueix (si el litoral està format per materials no cohesius), i b) traslladar-lo en el sentit resultant de l'angle d'incidència de l'onatge respecte de la costa (Bird, 2008). Els factors que intervenen en aquest procés de remobilització i transport sedimentari en el litoral són bàsicament l'alçada de l'ona, el seu període, l'angle d'incidència respecte a la línia de costa, i el pendent del fons marí. Tant l'alçada com el període de les ones són els que condicionen de forma directe l'energia d'aquesta. L'efecte de les ones sobre el fons marí comença a ser perceptible a partir d'una fondària igual o inferior a la meitat de la longitud de l'ona (Servera, 2004). Quan les ones s'acosten a la costa, van perdent velocitat en el seu camí. Així, aquestes disminueixen el seu període i la seva longitud d'ona. D'aquest fet se'n deriva que vagin augmentant la seva alçada fins que arriben a trencar-se (Figura 3).

Un altre dels factors amb influència sobre la morfologia del litoral és el vent. Aquest, en termes generals, es considera com un factor de segon ordre pels seus efectes directes sobre la franja costanera. Deixant a banda que és l'agent que genera l'onatge (Servera, 2004), la seva tasca és limitada a actuar com agent transportador en la part emergida dels sistemes litorals sedimentaris (veure més extensament a l'apartat 1.8). Els règims de vents litorals a les Balears està íntimament lligat al comportament del règim a escala regional. En l'estació freda hivernal i en les dues de transició, primavera i tardor,

predominen els vents de component N, seguits dels de component W. En canvi, durant l'estació més càlida predominen els de component E (Servera, 2004).



**Figura 4:** Els corrents marines són un dels agents mecànics més importants en tant a la configuració de les costes sedimentàries. Es poden distingir entre a) les corrents de deriva litoral, manco energètiques i paral·leles a la línia de costa, i b) les corrents de ressaca o *rip currents*, de retorn mar endins (Servera, 2004).

Els corrents litorals són també un dels agents que influencien en la formació morfològica de la franja litoral. Aquests assoleixen rarament valors suficients per a poder remodelar el fons marí o la costa en sí. Realment, sols tenen importància amb el transport de sediment aigües enfora, la qual cosa es converteix en fonamental per a la seva distribució (Pethick, 2001; Servera, 2004). A la zona de fregament i posterior

ruptura de l'onatge, aquest desplaça una massa d'aigua important cap a la línia de costa. El reiterat desplaçament de l'aigua provoca una concentració significativa que és compensada pel seu retorn cap a la mar mitjançant corrents de fons i en sentit contrari – segons Servera (2004), anomenats corrents de retorn o de ressaca (Figura 4B) –. En aquest tipus de corrents perpendiculars a la línia de costa però, cal diferenciar-hi dos tipus de models: un primer que correspon a un retorn difús, poc organitzat i de difícil observació, i un segon que es caracteritza per una organització del flux de retorn en cèl·lules (*rip currents*), que es defineixen en corrents concentrats i organitzats que poden arribar a velocitats relativament altes (Servera, 2004). A part de l'onatge, tot i que d'una forma més indirecta, el vent predominant també influeix en la direcció i el comportament de les corrents litorals (Marquès i Julià, 2005), així com també la morfologia i rugositat del fons marí (Esteban Chapapria, 1999)

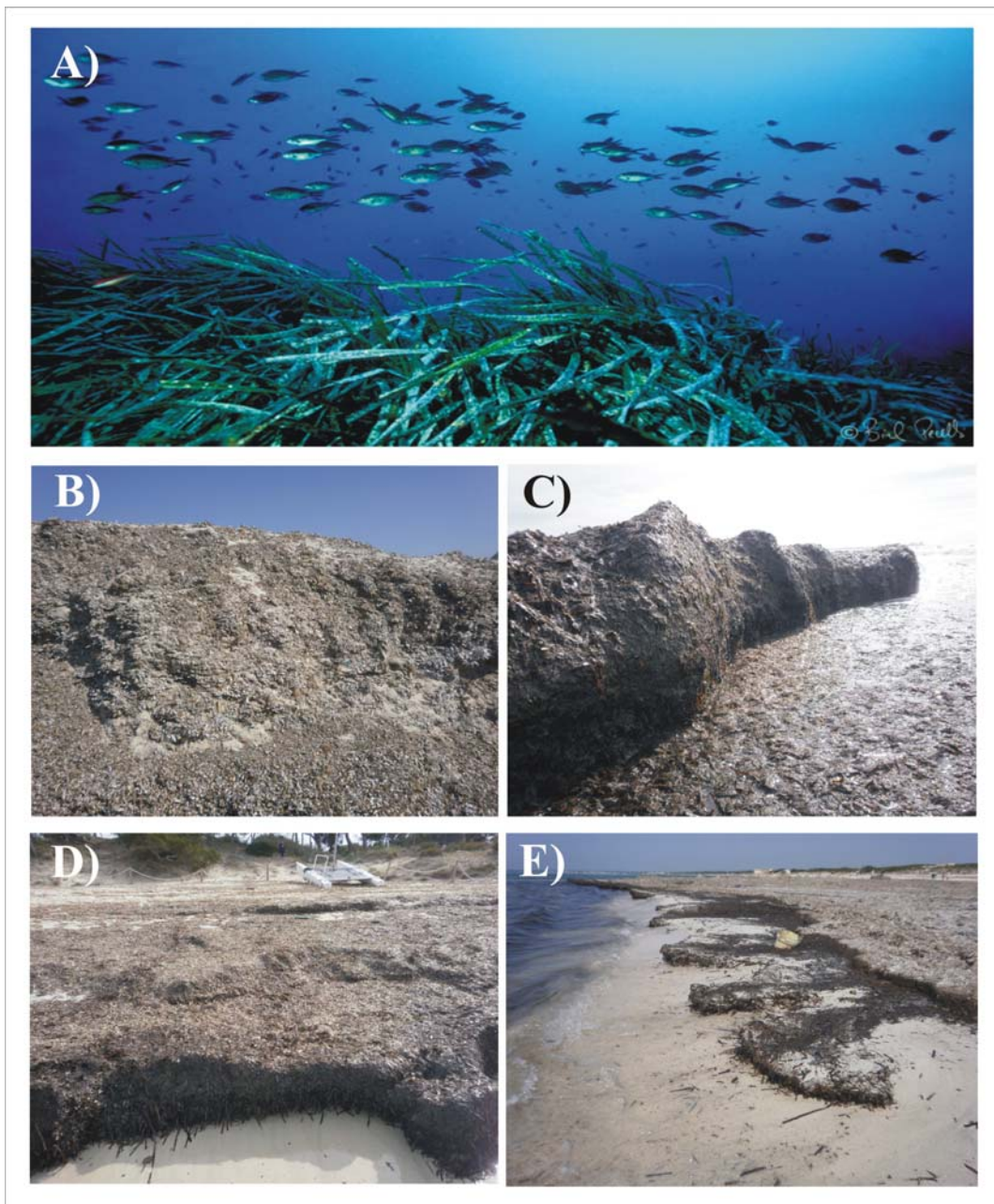
D'altra banda distingir les anomenades corrents longitudinals (Figura 4A). Aquestes es produeixen quan l'onatge incideix amb un cert angle sobre la línia de costa i és refractat, projectant un vector d'energia paral·lel a la vorera en el sentit de l'onatge. Aquest tipus de corrent, coneguts com deriva litoral, són de baixa velocitat, i afecten únicament a la zona situada entre el rompent de l'ona i la línia de costa. A les Balears són poc conegudes, degut a la morfologia retallada de la costa insular. Tot indica que només es manifesta en emplaçament litorals amples com en són les badies Palma i Alcúdia (Servera, 2004).

L'efecte dels corrents litorals es materialitza quan les ones rompen prop de la línia de costa. És en aquest moment quan es posa el sediments del fons marí en suspensió, per a que a continuació, les corrents de retorn i la deriva litoral facin la seva feina redistribuint el sediment al llarg de la costa (Soledispa, 2007). Els sediments, en especial l'arena però també els còdols i la grava, són transportats pels corrents i dipositats a la platja per les onades. A partir d'aquest moment el vent començarà a fer-hi feina, generant les morfologies arenoses abans comentades (veure més sobre el vent com a agent mecànic a l'apartat 1.8.)

Fins al moment s'han analitzat quins són els agents mecànics i físics que afecten en la configuració del litoral. Si més no però, els agents biològics també recal·len significant importància pel que fa a la formació, modificació i configuració de la franja costanera (de Rooij, 1995; Pethick, 2001; Servera, 2004; Hilton, 2006; Mir-Gual et al. 2013). Aquests destaquen més pel seu paper constructiu o de protecció del litoral que per la seva implicació en els processos d'erosió. La biodiversitat de les zones costaneres



és un atribut altament complex, resultant de la interacció entre múltiples factors físics i biològics (Carleton, 1991; Ricklefs i Schluter, 1993; Vasquez et al., 1998). Amb els anys, la comunitat científica ha demostrat de la importància que hi té el seu coneixement per arribar a una millor comprensió del funcionament costaner.



**Figura 5:** La *Posidonia oceanica* compleix amb una funció ecològica i geomorfològica important per a les costes sedimentàries de les Illes Balears. A la figura A) punt de biodiversitat important, B) imbricació de sediment en les acumulacions a la part emergida del sistema, C) berms d'acumulació a la línia de costa, D) exemple de cobertura i protecció de les acumulacions sobre la platja alta, i E) efecte “sandwix” amb intercalació de restes de Posidònia i sediment acumulat i imbricat.

En el cas concret del litoral balear cal destacar el rol que tenen les prades de *Posidonia oceanica* (Figura 5). El conjunt d'espècies que formen aquestes praderies tenen un paper insubstituïble en l'estabilitat dels litorals d'acumulació. La *Posidonia* és una planta endèmica de la Mediterrània que colonitza el fons marins arenosos. Aquesta planta (*seagrass*), popularment anomenada “alga”, és una fanerògama marina. Per aquest motiu, i a l'igual que les plantes terrestres, la llum del Sol esdevindrà un paper clau per a la regulació de la seva abundància i distribució (Ruiz i Romero, 2001). Es troba en formacions de prades submergides, que a les Balears, com a espècie fotòfila, es poden estendre fins a profunditats a prop de 40 metres, depenent molt de la claredat de les aigües i de la seva agitació.

De fet, les prades de *Posidonia oceanica* constitueixen els ecosistemes marins més importants de la Mediterrània per una doble raó: des del punt de vista biològic afavoreixen l'assentament i la colonització de diversos organismes i espècies. Mentre que des del punt de vista dinàmic i morfològic de la platja, constitueixen una peça clau en la producció de sediment i en la seva estabilització (Rodríguez-Perea et al. 2000; Roig-Munar i Martín-Prieto, 2003, 2005). Són uns ecosistemes madurs i amb una major producció de biomassa i de sediment que la resta d'associacions vegetals submarines de fons arenós (Servera, 2004)

Aquesta planta es caracteritza també per tenir un gran nombre d'epífits sobre ella. Principalment a l'època de tardor, quan es produeixen les majors tempestes de mar, les plantes perden les seves fulles externes. En aquest procés, gran part dels organismes queden atrapats a la pròpia praderia, i d'altres són transportats cap als dipòsits de sediment aeris. És d'aquesta manera que, l'eliminació de les praderies de *Posidonia* té dues connotacions negatives per a l'evolució i conservació de les platges. En primer lloc, l'eliminació d'aquestes suposa una disminució de la producció de sediment que després arriba a la platja alta, derivant-ne una reducció de la seva disponibilitat. D'altra banda, les acumulacions de fulles mortes a sobre de les platges suposa un fenomen de protecció molt important (Figura 5). És per això que si aquestes acumulacions són retirades, el substrat arenós queda força desprotegit envers a l'energia refractada per les ones. Les tècniques utilitzades actualment per la retirada de bermes de *Posidonia* són un factor erosiu puntual que s'agreuja mitjançant les pràctiques sistemàtiques en el temps i en l'espai, creant de forma constant una pèrdua sedimentària pel sistema, el qual depèn dels aports biogènics produïts en les praderies de *Posidonia oceanica*. Seguir amb aquestes tècniques pot suposar el increment de balanços sedimentaris negatius en molts

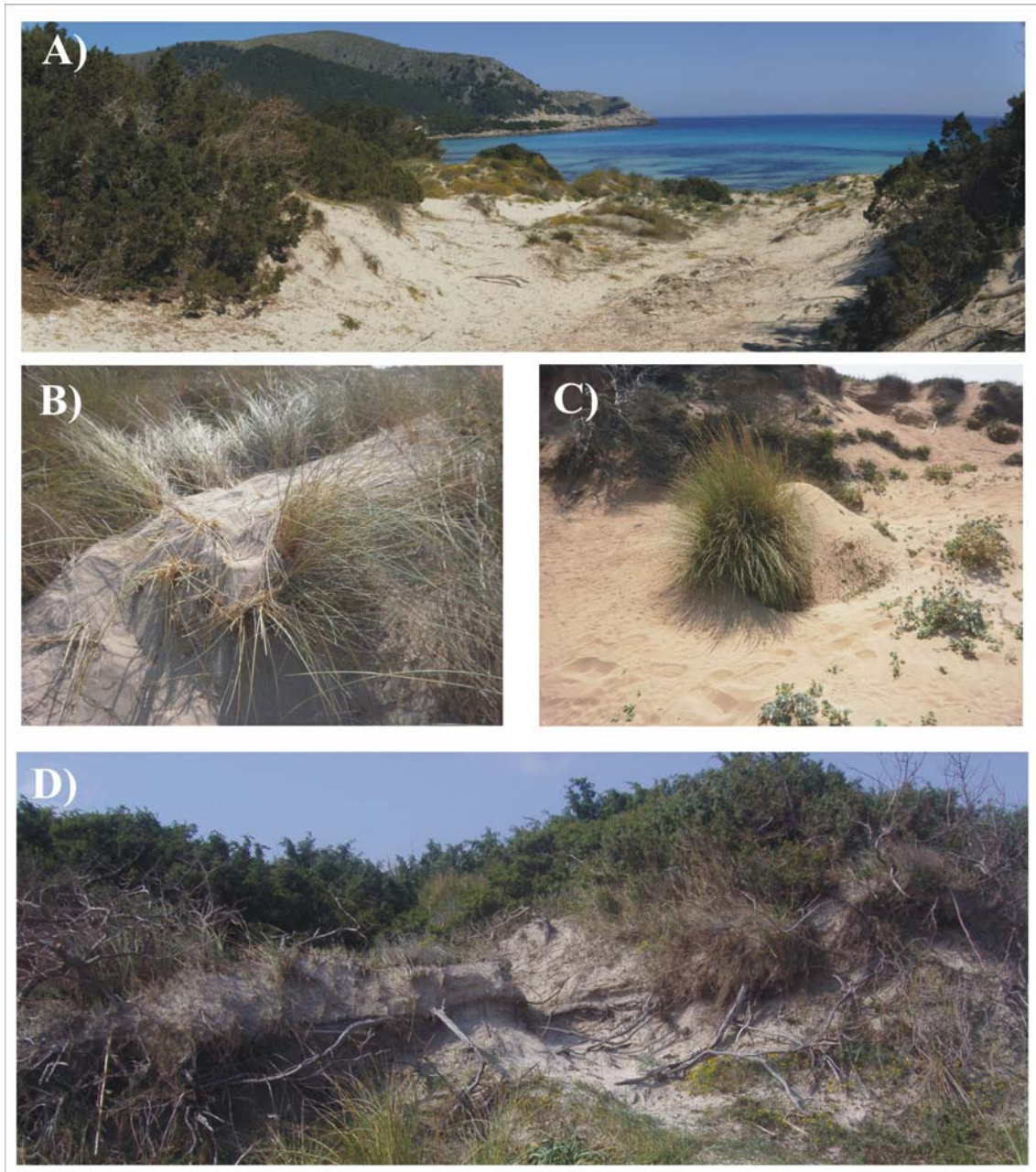
de sistemes platja-duna, fet que pot dur en sí accions tals com regeneracions artificials (Roig-Munar i Martín Prieto, 2005), com ja en va ser l'exemple, entre d'altres, la platja urbana de Can Picafort (Mallorca) a l'any 2002 (Basterretxea et al., 2007), després del temporal que hi ha haver al setembre de 2001, el qual va arrasar la platja degut a la desprotecció d'aquesta.

En el sistema platja – duna també s'ha de considerar la presència i el paper que juga la vegetació subaèria existent, amb incidència directa sobre les estructures arenoses que es formen i la seva morfologia, així com en l'equilibri i estabilitat de les platges (Servera, 2004). La vegetació psammòfila representa un paper important en la retenció de sediment i l'estabilització de les dunes (Figura 6 A, B, C), en gran part, pel fet de suposar un fre de la dinàmica litoral eòlica, al temps que un considerable element de fixació dels grans d'arena, conseqüència de la seva pèrdua de velocitat.

Són poques espècies les que poden sobreviure a tan altes condicions de salinitat i amb un substrat molt permeable (Pethick, 2001). Algunes d'aquestes espècies necessiten de continus subministraments d'arena, mostrant una molt bona adaptació al substrat mòbil on s'ubiquen, bé amb el desenvolupament d'un sistema d'arrels verticals, o bé, amb sistema radiculars extensos i superficials que els hi permeti aprofitar la humitat ambiental (Hernández Calvento, 2002). En els ecosistemes dunars de les Balears destaca una espècie, el borró (*Ammophila arenaria*), que colonitza el cordó de dunes davanteres, sent la més ben adaptada a la mobilitat del substrat, ja que és capaç de suportar el seu enterrament d'arena i l'abrasió que provoca el seu transport. D'altra banda, conseqüència de la seva estructura aèria, compta amb una significativa capacitat de retenció de sediment. No obstant, les comunitats d'*Ammophila* són les més afectades degut a la destrucció i sobre utilització de la primera línia de costa (Costa i Mansanet, 1981). Altres espècies de vegetació psammòfila en són el card marí (*Eryngium maritimum*) o el lliri de mar (*Pancratium maritimum*). D'altra banda, dintre del paper geomorfològic jugat per la vegetació, destacar el poder de fixació i estabilització que té la vegetació llenyosa o arbustiva a partir del seu creixement reticular (Figura 6D).

A part de les pròpies dunes, així com del vent i la seva direcció predominant, per explicar la distribució de la vegetació dins el sistema no ens podem oblidar del factor salí, tant en suspensió com la continguda en el sòl. Alguns estudis afirmen de la importància a considerar l'esprai salí com un factor ecològicament important dins el sistema platja – duna, i per la distribució de la vegetació que en ell es troba. L'esprai salí, conseqüència de l'acció de l'onatge i posterior transport del flux eòlic, es mostra a

més, com una font important de nutrients i factor controlador de la distribució vegetal. Boerner i Forman (1975) afirmen també que l'esprai salí pot limitar la distribució de plantes vasculars dins l'ecosistema dunar, la qual cosa obliga a que les espècies vegetals existents hagin de ser tolerants a les característiques salines de l'espai.



**Figura 6:** La vegetació és un dels elements més importants en tant a la configuració dels sistemes dunars litorals. A la figura veiem A) vista panoràmica de la funció de la vegetació herbàcia en tant a la retenció de sediment, B) arena depositada enmig d'individus d'*Ammophila arenaria*, C) formació de dunes embrionaries o *shadow dunes* responnent a la presència de vegetació herbàcia en primera línia, i D) fixació del front dunar a partir de la presència d'espècies llenyoses, e.g. *Juniperus oxycedrus subs. macrocarpa*.

La salinitat en els ambients dunars està íntimament relacionada, també, amb la capilaritat de les arenes. Conseqüentment, als sòls dels ambients dunars, sobretot a les zones més deprimides del sistema, l'aigua edàfica torna molt salina en el procés d'evaporació, formant en superfície unes crostes salines (Pye i Tsoar, 1990). Aquestes, degut a la seva textura, constitueixen un important factor d'oposició al procés d'erosió per deflació. El substrat edàfic d'aquests ambients es caracteritza pel seu alt contingut en sals, conseqüència de les aportacions contínues de sal pel fet de ser un espai limítrof amb la mar. L'aportació de sal cap al sòl dels ambients dunars es produeix, majoritàriament, a través de l'aigua, podent diferenciar tres processos diferents: a) la que prové de l'esprai marí, b) fluxos d'aigua en superfície (ones dipositades sobre la platja alta o *foredunes*) i c) fluxos d'aigua subterrània (Hernández-Calvento, 2002).

### **1.5. Caracterització de l'espai litoral**

A les Illes Balears tenim aproximadament un total de 1.239 km de línia de costa (Servera, 2004). Al llarg d'aquests s'hi pot apreciar un clar, tot i que no absolut, domini de costes rocoses. No obstant, la diversitat passa per sobre l'homogeneïtat quan parlem de tipus de costa a l'arxipèlag balear. A mode d'exemple, en el cas de Mallorca, tal i com quantifica Balaguer (2007), hi ha uns 626 km de costa dels quals el 81% és costa rocosa, el 9% es tracta de costes baixes sedimentàries, i el 10% restant passa per costes antropitzades (e.g. passejos marítim, ports esportius, etc.).

Existeixen molts tipus de costa (Figura 2), cada un dels quals presenta unes característiques úniques degut a les diferents masses rocoso-terrestres contra les quals els mars i oceans es veuen obligats a interactuar (Strahler i Strahler, 1989). D'aquesta premissa ja es pot diferenciar entre costes rocoses o altes, i costes baixes o de sedimentació. D'acord amb les característiques de la zones d'estudi tractades per la present tesi, es farà especial èmfasi a les costes d'acumulació, en les que, com és sabut, els materials que hi trobem tenen el seu origen en la deposició sedimentària sobre l'escorça terrestre (Pethick, 2001). Aquest tipus de costa es caracteritza pel seu dinamisme i per la seva vulnerabilitat envers als canvis derivats de factors i agents ambientals, fet que provoca alternança de balanços positius amb balanços negatius de sedimentació (Rodríguez-Perea *et al.*, 2000).

Les costes d'acumulació, tot i que les podem trobar inserides entre costes rocoses (Gómez-Pujol et al. 2013), abunden en zones estructuralment enfonsades i amb processos de subsidència (*grabben*). De fet, segons Gelabert, *et al.* (2002) un dels factors que ens determinarà la forma i l'escala de les acumulacions d'arena eòlica en seran les taxes d'aixecament tectònic i subsidència. A l'illa de Mallorca podem trobar tres exemples clars que representen a la perfecció aquest tipus de costa, com són les badies de Palma i d'Alcúdia, i la conca de Campos, mentre que en el cas de Menorca en podrien ser exemple el cas de Son Bou.

### 1.5.1. Els sistemes platja-duna

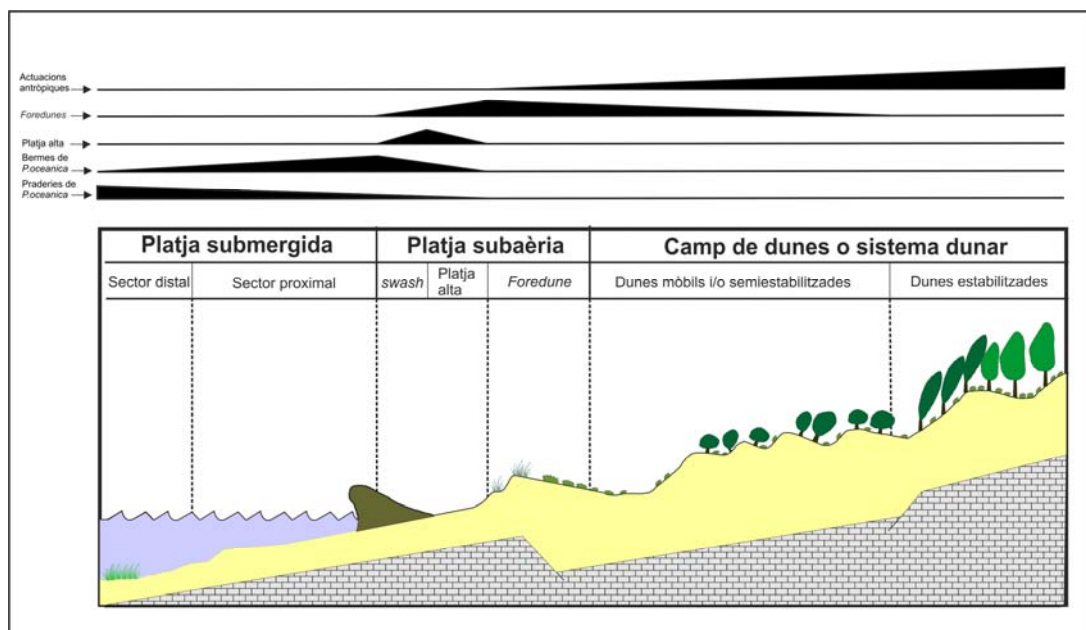
Els sistemes platja-duna són una de les manifestacions més conegudes en les costes d'acumulació. Cal pensar que al llarg del litoral de les Balears, aquests són els sistemes més complexos, i a la vegada, els més fràgils de tots. És una superfície on el seu equilibri es fonamenta en una perfecta simbiosi entre el món biòtic i abiòtic, el món submergit i l'emergit (Mir-Gual et al., 2012).

Dels elements que defineixen i conformen aquests sistemes, la unitat dunar assoleix una rellevància important. Bauer i Sherman (1999) afirmen que les dunes són components fonamentals per la geomorfologia de la majoria de costes arenoses arreu del món, suposant un *buffer* de protecció de la costa enfront de la seva erosió. Segons Criado (1988) i Hernández-Calvento (2002) es poden definir com dunes aquelles formes del relleu que són producte de l'acció del transport i sedimentació eòlica, constituïdes per sediments fins, com arenes o llims incoherents.

És cert que, avui dia, hi ha molts d'aquests sistemes que sofreixen greus problemes al llarg del litoral. Tanmateix, hi ha hagut una tendència inamovible de relacionar aquests problemes d'equilibri amb els constants canvis del nivell del mar al llarg del temps, amb especial èmfasi sobre el Plistocè i Holocè, producte de la conjugació de factors físics, climàtics, glacio-eustàtics i de subsidència (Goso, 2006). No obstant, està provat i verificat empíricament que la zona litoral s'adapta de manera constant, rítmica i sincrònica a les situacions esdevingudes pel que fa als canvis del nivell del mar. No funciona d'igual manera enfront als canvis provocats per la pressió humana. Des de la meitat del segle XX, amb l'explosió de l'activitat turística a les Illes Balears, especialment a Mallorca, els sistemes dunars litorals han estat, possiblement, els ambients més perjudicats degut a la seva localització en indrets de costes baixes i

arenoses, idònies per l'establiment de l'activitat turística i per les seves respectives infraestructures. Com a conseqüència d'aquestes característiques, l'ocupació del litoral per l'ús d'un turisme de masses ha generat una degradació de les platges a tenir en compte (Rodríguez-Perea et al., 2000). En aquest sentit, Mir-Gual et al. (2012a), deguda la fragilitat d'aquests sistemes, complementada per la gran pressió a la que es veuen sotmesos recurrentment, defineixen alguns punts que, atenent a la seva alta fragilitat, la seva alteració suposa un impacte negatiu, no tan sols a escala local, sinó de manera sinèrgica podent inclús afectar a la integritat del sistema. Així els Mir-Gual et al. (2012) parlen de “corbes de sensibilitat” en sistemes platja-duna (Figura 7).

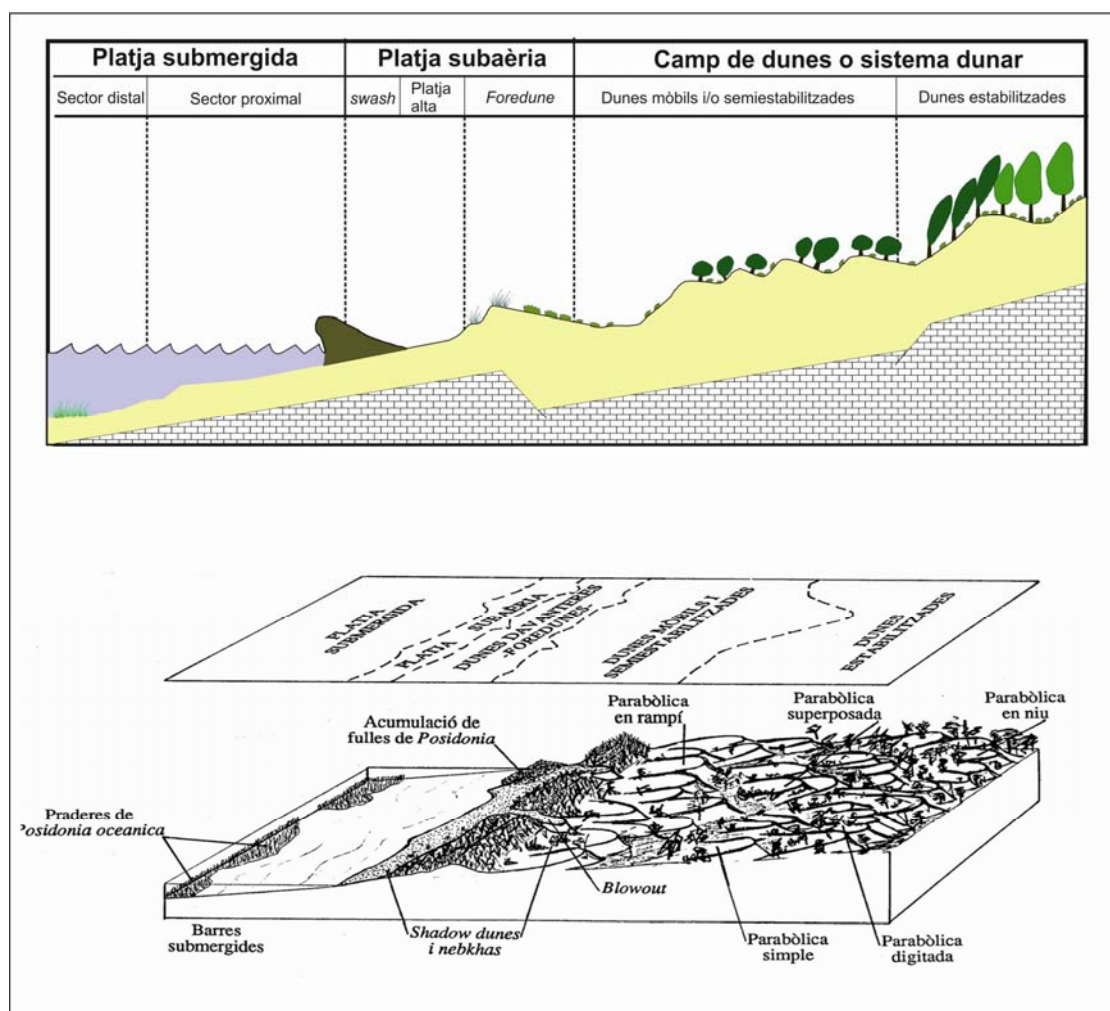
El sistema platja-duna comporta considerar una extensió significativa que va des de la zona submergida fins a la zona subaèria, que esdevindrà com l'emplaçament de sedimentació (Figura 8). Les platges són uns ambients que, des d'un punt de vista morfodinàmic, no es poden deslligar del que succeeix en els camps de dunes litorals, ni tampoc de la part de la platja que roman submergida (Rodríguez-Perea et al., 2000).



**Figura 7:** Corbes de sensibilitat definides per Mir-Gual et al. (2012a) en el cas dels sistemes platja-duna de la Mediterrània occidental. La part superior mostra l'efecte sinèrgic que un impacte local pot tenir sobre la resta del sistema, afectant la seva integritat.

La zona de platja submergida (infralitoral o “*nearshore*”) (Figura 8) constitueix una zona permanentment inundada per l'aigua, on podem diferenciar clarament dos sectors (Figura 9); en primer lloc destacar el que es coneix com a sector distal (la zona més allunyada de la costa, amb profunditats no superiors als 40 metres), on els

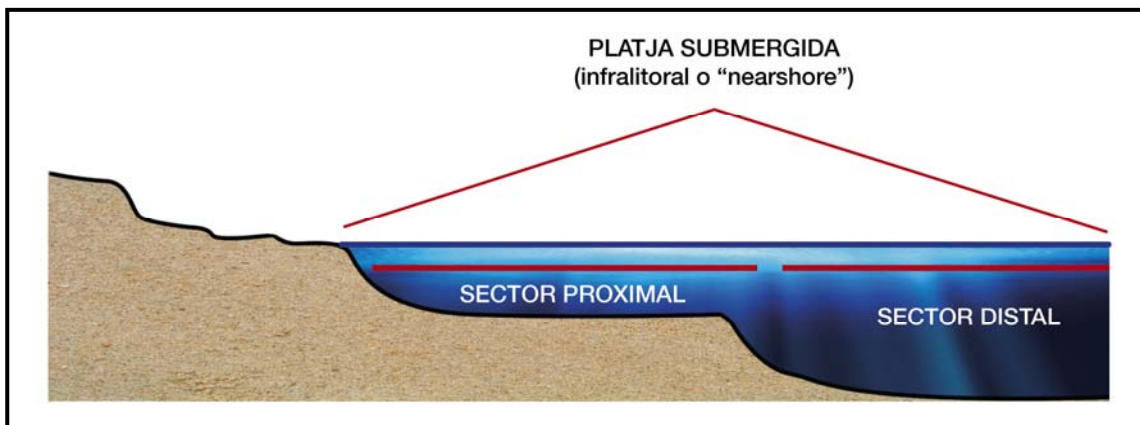
processos morfològics i dinàmics són més atenuats ja que l'energia de les ones no és tant forta (Servera, 2004). A les platges de les Balears es presenta un pendent suau que oscil·la entre el 0,25% i el 2,5%, que amb l'ajuda de la influència de la llum del Sol, el fa ideal pel desenvolupament de les praderies de *Posidonia oceanica* (Rodríguez-Perea et al., 2000). D'altra banda, el sector proximal constitueix la zona més activa pel que fa a la remobilització i al transport de sediment per l'onatge cap a la línia de costa (Servera, 2004). Aquest sector és relativament ample i amb profunditats inferiors a la franja anterior. Amb aquestes característiques, i a través del fregament de l'onatge pel fons i els corrents que aquest genera, en aquest sector és a on es produeix la redistribució del sediment al llarg de tota la línia de costa (Massutí et al., 2000; Rodríguez-Perea et al., 2000)



**Figura 8:** Representació esquemàtica del model de sistemes platja-duna a les Illes Balears. Aquests s'han de considerar com a subunitats lligades entre sí, i mai per separat. La interacció entre cada una d'elles és la que donarà l'estabilitat a la integritat del sistema. Infografia inferior de Servera (1997).



La platja subaèria (mesolitoral o *foreshore*) (Figura 8) és la zona de transició entre els dos subambients principals, i a on es produeix la transferència de sediment entre la part submergida i l'emergida, o viceversa. Al no existir situacions de mareas, a les Balears aquest sector es correspon a la zona de vaivé de l'onatge (*swash*), sent una zona molt dinàmica pel que respecte a l'intercanvi de sediments entre la zona emergida i la submergida. Com a resultat d'aquest dinamisme, el mesolitoral pot augmentar o disminuir la seva superfície amb relativa facilitat. Degut a les seves característiques, sent lloc de confluència entre dos ambients, aquesta és una franja amb una diversitat biològica significativa, no tan sols a les costa sedimentàries, sinó també a les rocoses (Almanza et al., 2003).

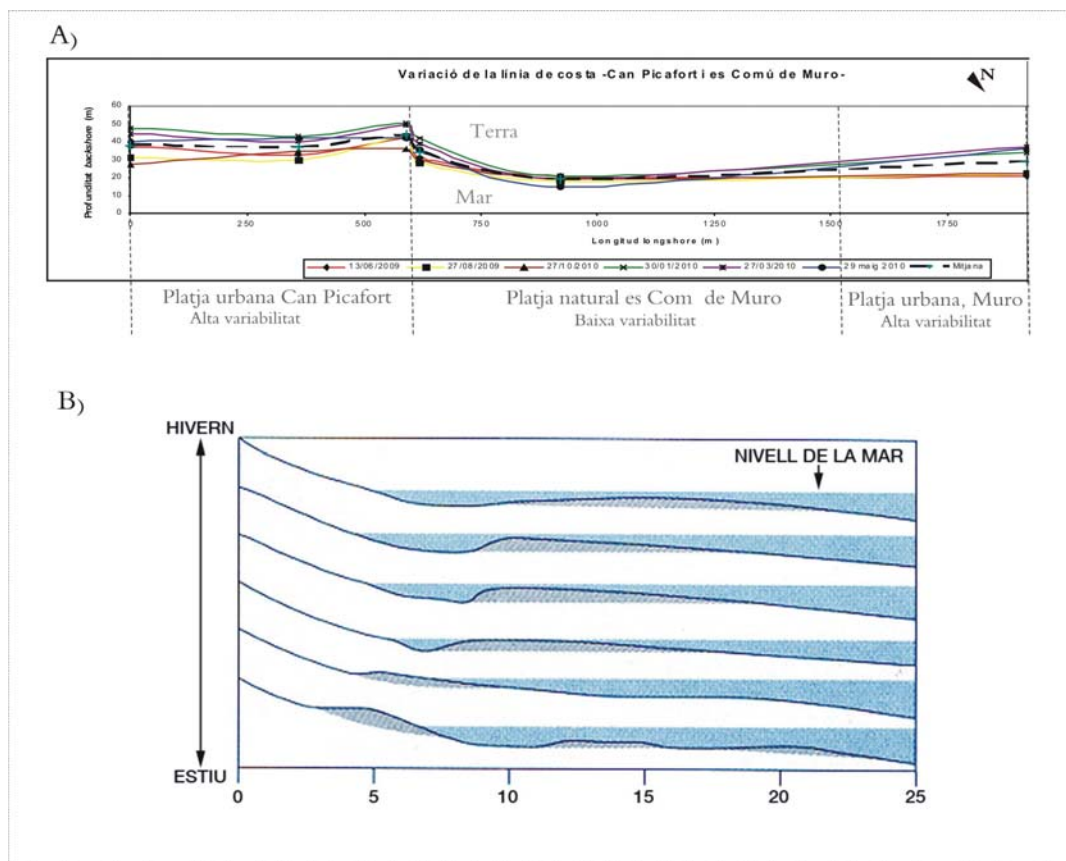


**Figura 9 :** Zonificació (sense escala) de la platja submergida. Com es pot apreciar, al sector proximal la profunditat és força inferior, fet que fa que la influència de l'onatge, degut al roçament, sigui superior.

La platja subaèria (supralitoral o *backshore*) és la zona a on es donen els processos i mecanismes de transferència sedimentària (Figura 8). A més d'aquesta funció, també esdevé la reserva de sediment que permet garantir l'equilibri de la platja submergida, quan aquesta és afectada per grans temporals de mar (Servera, 2004). Aquesta també es caracteritza pel seu alt dinamisme i variabilitat, no tant a llarg termini sinó també en una escala estacional. La pròpia dinàmica litoral (Figura 10B), o efectes externs com en puguin ser les mesures de gestió o els patrons de freqüentació (Figura 10A) suposen que aquests no siguin en cap cas espais fixes (Mir-Gual, 2009).

Al *backshore* (Figura 8) cal diferenciar dos sectors: la platja alta i el cordó de dunes davanteres (*foredunes*). La platja alta estaria compresa entre la platja intermitja i les dunes davanteres. La diferència d'aquest sector amb l'anteriorment definit (mesolitoral) recau amb els trets geomorfològics i amb la seva dinàmica, ja que en el

seu modelat i equilibri també s'inclouen els processos de transport eòlic (Rodríguez-Perea et al., 2000). En aquest cas, la influència directa de la mar gairebé és inexistent, sent l'eòlica la més important (Bird, 2008). Aquest sector sol presentar un perfil que dibuixa un suau pendent cap a la mar. Si més no, la influència de l'onatge en ocasions de temporal pot arribar a actuar sobre aquest sector, modificant el perfil (Mir-Gual, 2009).



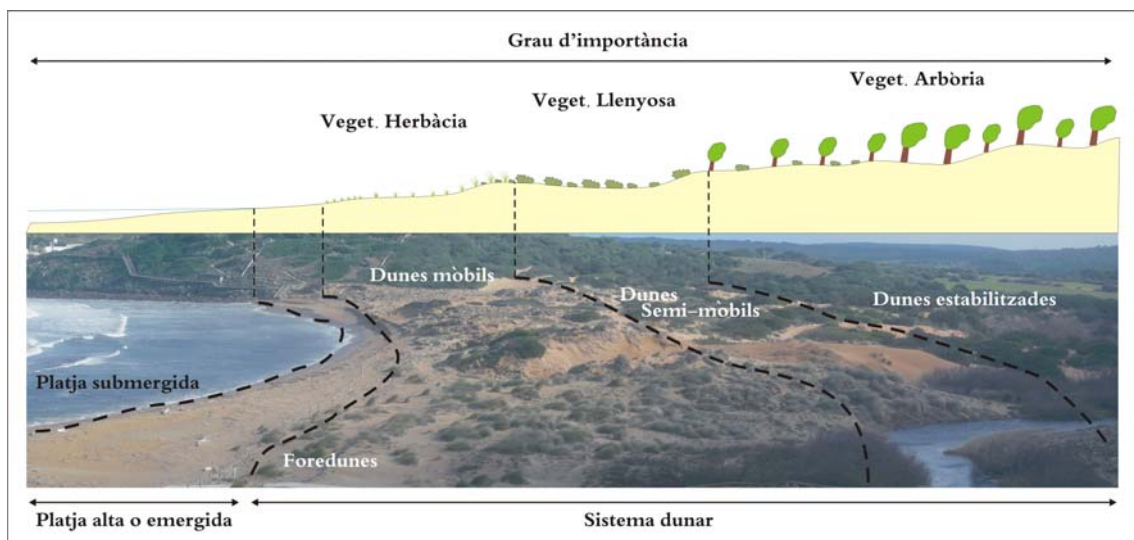
**Figura 10** : Dos exemples de la variabilitat mostrada per la línia de costa i la superfície de platja emergida; a) variabilitat anual de les platges urbanes de Can Picafort i Platges de Muro, i la platja natural d'Es Comú de Muro (Mallorca). Les platges urbanes, amb una major freqüentació, serveis de platja i tècniques de neteja i acomodació mecàniques presenten una major variabilitat (induïda per l'home) que no el sector natural, més estable (modificat de Mir-Gual, 2009; 2011) i b) exemple de la variabilitat estacional en resposta a la dinàmica litoral estacional (modificat de Davis and Fitzgerald, 2004).

Arribats a aquest punt del sistema, és necessari diferenciar les geoformes que es generen, tant fent referència a les formes individuals i simples, com a les que han estat resultat de la interacció entre distints elements. Seria un error pensar però, que la construcció del camp dunar i els seus canvis i evolució depenen únicament i exclusivament de la relació binomial sediment – vent. Molt al contrari, el funcionament i comportament d'aquests complexos sistemes es veu condicionat per la interferència d'altres factors. Pensem sinó amb la vegetació i les característiques que aquesta presenta, la humitat ambiental, que pot condicionar la compactació del sediment arenós,

la topografia local o simples obstacles artificials imposats per l'avarícia de l'activitat de l'home. Gelabert et al. (2002) i Pye (1993) verifiquen la complexitat dels sistemes dunars pel que respecte a la seva formació, afirmant que la forma i l'escala de les acumulacions d'arenes eòliques estan determinades a partir de set factors diferents: a) la disponibilitat d'arena, b) la distribució de la mida de gra, c) la distribució de la velocitat del vent i la variabilitat en la seva direcció, d) la coberta vegetal i les característiques del seu creixement, e) la topografia i la batimetria dels voltants, f) els canvis climàtics i del nivell del mar, i g) les taxes d'aixecament tectònic i de subsidència.

Tot i que el denominador comú múltiple de la formació de dunes sempre en sigui la vegetació, aquestes rebran distintes denominacions en funció de la forma, de la mida i de la mobilitat dels sediments. D'aquesta manera podem definir acumulacions a sotavent com *shadow dunes* – sempre associades a la presència de vegetació – o *lee dunes* – les quals poden formar-se a partir d'altres objectes –, i dunes vegetades com les denominades *hummock* i *sandhills* – monticles d'arena –, *heyedogs* – amb escassa i nul·la mobilitat, totalment cobertes per vegetació herbàcia – i *coppice dunes* – amb retencions de fins a dos metres d'altura – (Pye i Tsoar, 1990; Pethick, 2001).

En el cas de les Illes Balears, des d'un punt de vista geomorfològic, els sistemes dunars, malgrat a que la zonificació faci l'efecte de ser caòtica, sense formes específiques, responen a sistemes de dunes parabòliques organitzades en cordons disposats de manera paral·lela a la primera línia (Servera, 1997).



**Figura 11** : El grau d'evolució i fixació dels sistemes dunars està íntimament relacionat amb la cobertura vegetal i la seva tipologia. En el cas dels sistemes illencs, hi ha una gradació que va des d'espècies herbàcies en primera línia fins a un estrat arbori el qual estabilitza i fixa el sistema. Infografia feta sobre el sistema dunar de Cala Tirant (Menorca).

Les *foredunes* són les primeres acumulacions permanents, malgrat que el sediment que les forma no presenta cap tipus d'estabilització. Hesp (2002) els defineix com un petit cordo dunar, al límit del *backshore*, format a conseqüència de la deposició de sediment dintre la vegetació, degut a l'efecte transportador del vent. Així, qualsevol alteració de la comunitat vegetal suposaria una modificació de la dinàmica i de la morfologia d'aquesta franja. Com ja remarcàvem en ocasions anteriors doncs, d'aquestes possibles conseqüències se'n deriva la importància de la gestió, protecció i preservació de la vegetació psammòfila, essencial per formar les primeres dunes embrionàries i efímeres (*nebkhas* i *shadow dunes*). Aquestes primeres formes dunars (*foredunes*) se troben a continuació de la platja alta, i separades del camp dunar madur per una petita zona deprimida de transició. Les *foredunes* han estat classificats dintre d'una gran varietat, tot i que generalment s'acaba parlant de dos tipus diferents: els incipients i els estabilitzats, dins dels quals es poden donar una àmplia varietat de morfologies i característiques ecològiques (Hesp, 2002; Hesp i Walker, 2013).

Per últim, en el sistema platja-duna s'ha de parlar del camp dunar (Figura 8), diferenciant-se del primer cordó, esmentat anteriorment. En primer lloc, perquè les acumulacions de sediment van progressant de cap a l'interior, augmentant les seves dimensions tant amb altura com en planta. D'altra banda, també es percep un canvi en la vegetació, de cada vegada més densa, primer amb un estrat arbustiu llenyós, i acabant amb tipus arbori (Figura 11). Des del punt de vista geomorfològic, tot i semblar que aquesta sigui una zona sense organització ni pauta alguna, respon a dunes parabòliques disposades en cordons paral·lels a la línia de costa (Servera, 2004). La formació d'aquests cordons recolza etapes de baixada del nivell de la mar, moment en que els sediments que van quedar en superfície, i que en el passat havien estat submarins, van ser remoguts pel vent cap a la zona del camp dunar, donant lloc a l'inici de la formació d'aquestes dunes.

El sector supralitoral, en un gran nombre de platges de les Illes Balears, és el més alterat, tant des del punt de vista morfològic com ecològic. Com a conseqüència, és realment complicat que es duguin a terme processos complets de formació, coalescència i transferència de les dunes embrionàries cap a l'interior (Rodríguez-Perea et al., 2000).



**Figura 12 :** A la imatge diferents exemples de morfologies *blowout* existent al front d'alguns sistemes dunars de les illes de Mallorca i Menorca. Les figures A, B, C i D fan referència a formes simples i de dimensions no gaire considerables, mentre que les E i F reflecteixen alguns exemples a on els sistemes, de manera integral, es desenvolupen sota un fort control estructural, en aquests casos generant grans *blowouts*.

## 1.6. Marc teòric de les morfologies erosives *blowout*

Els sistemes platja-duna, sent per definició sistemes altament dinàmics i espais d'interacció entre el món marí i terrestre, i entre mecanismes abiòtics i biòtics, comporten tendències de reajustament contínues que poden generar, en funció de la situació, escenaris d'acreció sedimentària, o bé d'erosió. Atenent la incidència en que els distints agents interactuen sobre aquests sistemes, hi ha tendència a que algunes morfologies es desenvolupin incrementant alguna de les dues situacions abans esmentades; accreió i/o sedimentació. Aquest epígraf es centrarà doncs amb desenvolupar el marc teòric sobre les morfologies *blowouts* existents en sistemes dunars, i les implicacions sinèrgiques que aquestes puguin tenir per a la seva totalitat.

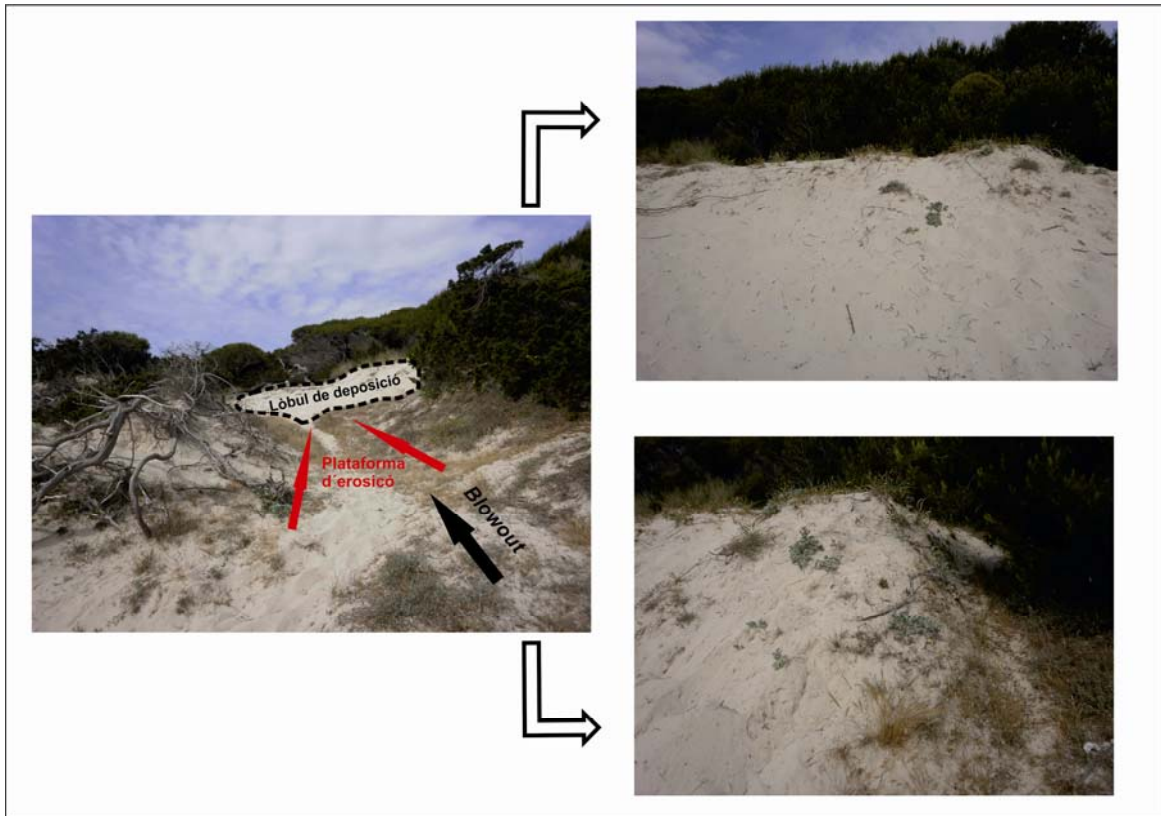
### 1.6.1. Què entenem per *blowouts*? Definicions

Tot i que les morfologies *blowout* són, encara a dia d'avui, un realitat amb un llarg recorregut d'estudi pendent, l'interès que la disciplina científica ha anat mostrant al llarg del temps ha fet que, almanco, el marc teòric s'hagi anat reblint de nous coneixements.

Del repàs de la literatura existent es poden extreure varies definicions al respecte, totes basant-se amb la seva ocurrència i caracterització física (Bagnold, 1954; Flor, 1984; Hesp, 1996; Bate i Ferguson, 1996; Hesp i Hyde, 1996; Davis i Fitzgerald, 2004; Mir-Gual i Pons, 2011; González-Villanueva et al., 2011; Smyth et al., 2011, 2012; Mir-Gual et al., 2013; Hesp i Walker, 2013). Dintre d'ambients litorals sedimentaris, tals com els sistemes platja-duna, les morfologies *blowout* es solen definir com “depressions” de forma circular (*bowl* o *saucer*) o perllongada (*trough*) formades per l'acció del vent en acumulacions d'arena preexistents (Figura 20). No obstant, dintre d'un debat notablement actiu en l'actualitat, alguns autors manifesten que, a part dels agents naturals, la pressió antròpica també ha de ser un factor a considerar quan es parla de la formació i evolució d'aquestes morfologies (Bate and Ferguson, 1996).

Tot i que de les definicions postulades es desprengui la consideració de que els *blowouts* són formes estrictament erosives, sembla que amb el temps s'ha engendrat un important consens el qual, a partir de diversos estudis, postula que el lòbul de deposició, normalment existent a la part més interior, també ha de ser considerat com una part del *blowout* en el seu conjunt (Figura 13) (e.g. Glenn, 1979; Carter et al., 1990; Hesp,

2002), generant doncs una diferenciació entre una àrea d'erosió, una àrea de transport i una darrera de sedimentació.



**Figura 13** : A la imatge esquerra es reflecteix l'existència de una zona erosiva (front) i de transport (al llarg de la plataforma d'erosió), i una zona de deposició (al fons). Degut a aquest fet doncs, autors com Glenn (1979), Carter et al. (1990) o Hesp (2002) consideren que el lòbul de deposició sedimentaria (imatges de detall a la dreta de la figura) també s'hauria de considerar com una part d'aquestes morfologies a l'hora de ser estudiades i analitzades.



**Figura 14** : Imatge 3D (sense escala) que il·lustra la sectorització interna de *blowouts*. Degudes les característiques físiques (sobretot topogràfiques) i la incidència i intensitat dels agents que en elles actuen (principalment l'acció del vent) determinen l'existència d'una zonació interna caracteritzada per una zona d'erosió (1,2) i una zona d'acumulació o sedimentació (3) (Mir-Gual et al., 2013).

A pesar de que cada una de les morfologies, sobretot estant inserides en ambients tant dinàmics, fràgils i vulnerables, puguin presentar situacions intrínseques i específiques, sembla a ser que, responent als diferents processos i agents donats, mantenen en comú i de manera generalitzada una determinada zonació interna. Així doncs, tal i com postulen autors com Hesp (2002), caldria diferenciar entre; 1) el canal de deflació o la base d'erosió, coincidint amb l'espai a on el vent actua amb major intensitat deguda la seva canalització, 2) les parets laterals d'erosió, i 3) el lòbul de deposició, lloc a on es dona el major rati de sedimentació (Figura 14). Aquesta diferenciació espacial dintre de les morfologies *blowout*, tal i com es mencionava anteriorment, dependrà de les característiques pròpies de cada cas, i de la intensitat en la que es donin els diferents agents que hi interactuïn. Així, al marge exterior del *blowout* i al llarg del canal de deflació, amb incidència directa dels vents que entren de la mar, es donarà un input d'energia que incrementarà el poder erosiu, en aquest cas del vent vers a la duna, mentre que a la part més interior, amb una pèrdua de velocitat conseqüència



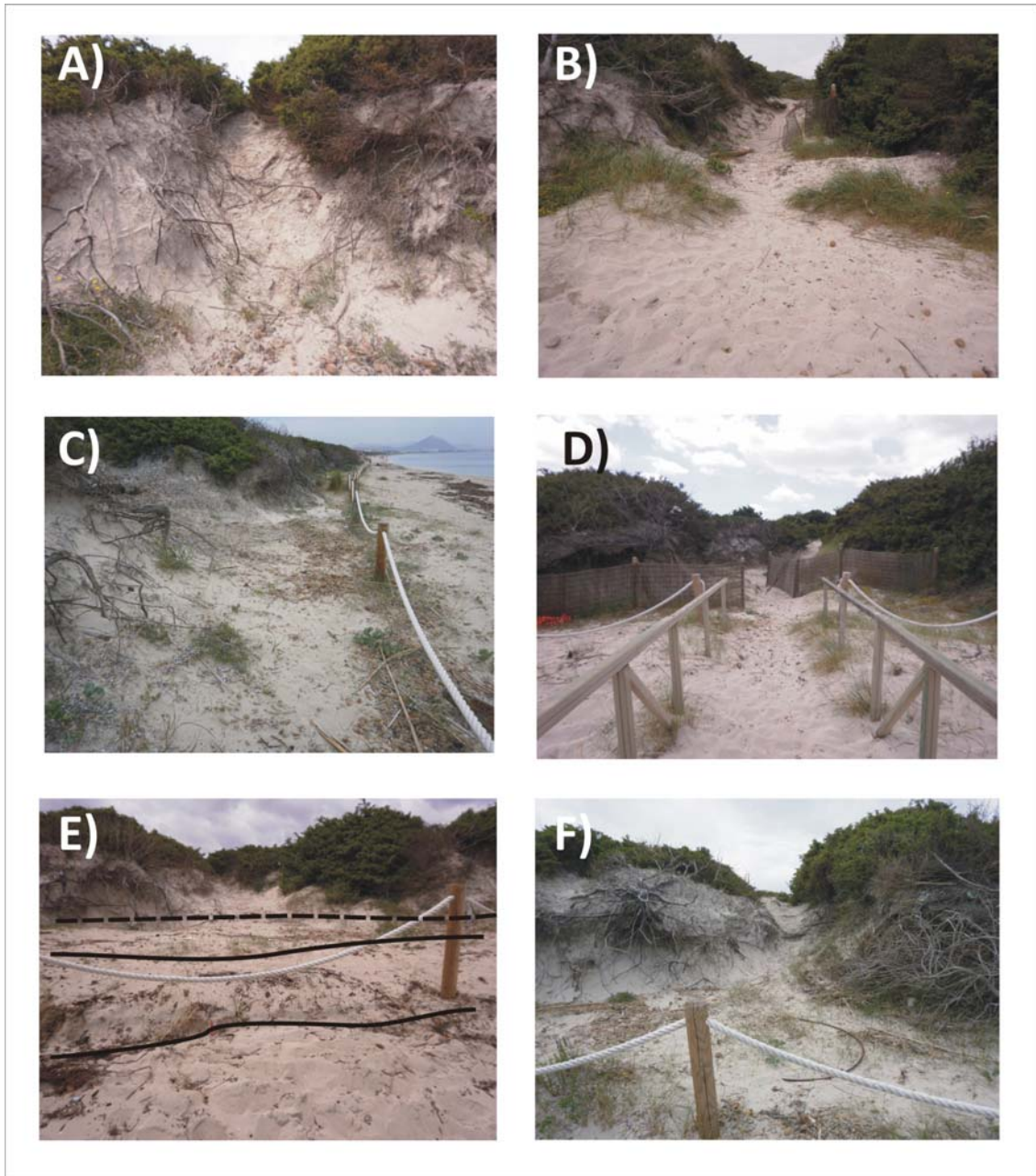
de la divergència del flux, es donaran les condicions per a que, deguda la força de gravetat, el sediment transportat en suspensió sigui dipositat (Smyth et al., 2013).

### 1.6.2. Gènesi i evolució

Si amb el temps s'ha anat engendrant una definició unànime de *blowout* dins de la disciplina científica centrada en el seu estudi (veure epígraf 1.6.1.), sembla ser que la situació és distinta a l'hora de parlar sobre quin és el seu origen, i quins són els mecanismes que els generen. D'ara per endavant però, i un cop repassada la bibliografia existent al respecte, dir que les condicions locals de cada sistema dunar, amb totes les implicacions que això pot comportar, semblen tenir un pes important al temps d'establir amb autoritat l'origen de dites morfologies.

Pensant en sistemes dunars poc alterats des del punt de vista antròpic, els agents mecànics o físics s'estableixen com els més incidents a l'hora de provocar l'origen d'un *blowout*. Són diverses les teories que es postulen per a defensar un o altre agent. Dintre de la bibliografia existent en destaquen, en primer lloc el vent, i en segon la incidència de l'onatge sobre la primera línia de dunes, a part d'altres factors col·laterals tals com la presència de vegetació. No obstant, cal considerar la vegetació com un element preventiu, sobretot pel que fa a mecanismes de protecció en contra dels processos erosius en primera línia dunar. Patriquin (1975), i en relació al que ja estipulaven Ginsburg i Lowenstam (1958) incidia sobre la; a) importància de la vegetació com element de protecció vers a l'erosió, b) destacar-ne la seva funció natural per a retenir els sediments transportats pel vent i, c) generar nous hàbitats que ajudin a contribuir amb la conservació de l'ambient. La importància indirecta de la vegetació en tant a l'origen de *blowouts* ha estat un tema tractat i mencionat per més autors. Hesp i Hyde (1996) postulen que una absència o disminució de la cobertura vegetal cap ser considerada com un factor crític en tant a l'inici d'un *blowout*, donant suport al que ja havia estat demostrat per altres autors amb anterioritat (e.g. Jennings, 1957; Guilcher, 1958; Steers, 1964; King, 1972; Bird, 1976; Carter et al., 1990). Tot i que la absència o presència de vegetació no contribueix directament amb la formació de *blowouts* – entenent que no és la força principal que els genera –, si que en pot tenir un paper rellevant en la totalitat del procés de formació i evolució. En aquest sentit, Jungerius i van der Meulen (1997) postulen que tot i que la vegetació no tengui relació directe amb

la incidència del vent, si que aquesta s'ha de considerar per les conseqüències que pot generar vers a la retenció de sediment.



**Figura 15 :** A la figura alguns exemples que suggereixen situacions compromeses amb l'origen de morfologies *blowout* a la primera línia de dunes (exemples del sistema d'es Comú de Muro, Mallorca); a) mostra l'estat inicial i embrionari de la morfologia, just al seu inici i a on la plataforma erosiva es va estenent terra endins, b, c) l'absència de vegetació pot suposar un agent que potencia la formació i desenvolupament de *blowouts*, d) exemplifica la incidència antròpica alhora d'intensificar els processos erosius en primera línia, e,f) exemples de la incidència de l'onatge sobre la primera línia de dunes, provocant un desmantellament sedimentari (e) i la destrucció de la vegetació herbàcia existent (f).

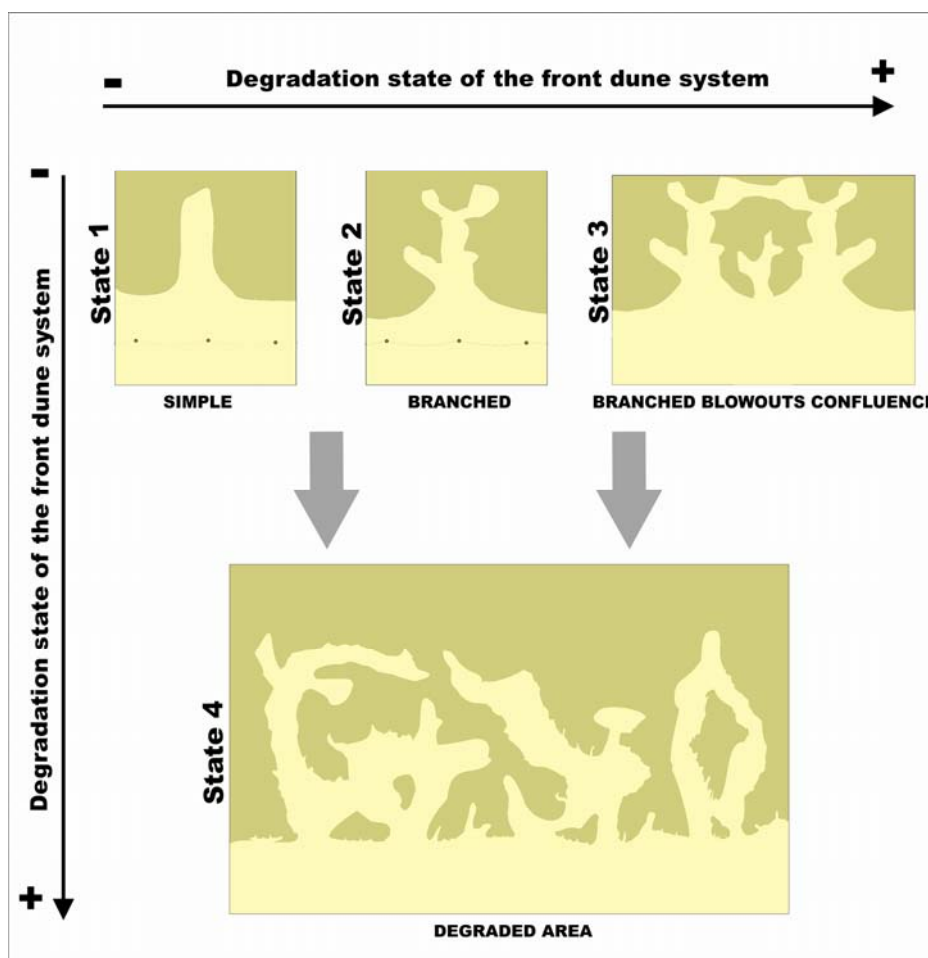
Amb la vegetació com element preliminar a tenir en compte, estem en condicions ja de començar a esmentar els agents que, per l'*imput* energètic que exerceixen sobre el sistema platja-duna, tenen la capacitat suficient com per a suposar l'origen d'una morfologia *blowout*. D'entre els possibles candidats a tal conseqüència sembla ser que en destaquen dos agents. De la bibliografia estudiada en sorgeix un manifest acord en establir l'acció del vent com l'agent principal a l'hora d'originar la seva formació i posterior desenvolupament. No obstant, autors com Hesp (2002) postulen que l'origen de les morfologies *blowout* es pot deure a; a) erosió de la primera línia de dunes a conseqüència de l'onatge, b) l'acció del vent, c) canvi climàtic, d) variació de la cobertura vegetal en una escala temporal i/o espacial, e) erosió per escorrentia superficial, f) activitats antròpiques (Figura 15). En aquest sentit doncs, i suposadament a conseqüència de la fragilitat característica d'aquests ambients, la formació i l'origen dels *blowouts* pot ser deguda a diversos esdeveniments. Aquest fet du a pensar també amb que un efecte sinèrgic de diferents agents alhora pot incrementar aquest procés de formació i evolució.

No obstant, tal i com es mencionava anteriorment, la bibliografia sembla donar major pes a l'acció del vent i l'onatge com a principals responsables de les morfologies *blowout* (Hugenholtz i Wolfe, 2009; Hesp and Walker, 2012; Smyth et al. 2012), i més recentment, i en funció de la localització dels sistemes (e.g. la Mediterrània occidental) també a la pressió antròpica soferta a conseqüència de l'activitat turística (Mir-Gual i Pons, 2011; Mir-Gual et al. 2013).

Des d'una certa perspectiva general, i destacant els dos agents ja esmentats, Hesp i Walker (2013) postulen que; a) l'erosió de la primera duna a conseqüència de l'onatge (o temporals de mar) pot generar un escarpament, i en conseqüència, una desestabilització del primer cordó de dunes i una desaparició de la vegetació, b) en àrees debilitades des d'un punt de vista geomorfològic i ecològic l'acció del vent tindrà més incidència a l'hora d'incrementar la tendència erosiva i per tant, a potenciar la formació de morfologies *blowout*.

Si bé el coneixement de l'origen d'aquestes morfologies és clau per a la correcte interpretació dels sistemes platja-duna i del seu funcionament, no manco importància recau en conèixer quins són els seus patrons de creixement i evolució. Les morfologies *blowout*, tot i que darrerament sembli haver un consens a l'hora d'incloure en la seva definició el lòbul de deposició sedimentària format a la part interior (e.g. Glenn, 1979; Carter et al., 1990), esdevenen plataformes caracteritzades pels processos erosius. Un

cop originats, la topografia derivada condueix a una canalització del flux eòlic que s'endinsa des de la mar terra endins, incrementant la seva velocitat i, en conseqüència, el seu poder erosiu, sobretot al llarg de la plataforma d'erosió (Hesp and Hyde, 1996; Fraser et al., 1998). D'aquesta manera doncs, les plataformes erosives incrementen les seves dimensions considerablement, arribant al nivell basal (Hesp, 2002). Des d'una perspectiva genèrica, una vegada iniciats, el seu desenvolupament dependrà de la seva mida inicial, de l'amplada i longitud de la duna en la qual el *blowout* es desenvolupa, del grau de cobertura vegetal i tipus de vegetació existent (Esler, 1970), de la magnitud dels vents incidents predominants (Cooper, 1958) i del grau d'exposició del *blowout* front a vents de distintes direccions (Jennings, 1957; Gares et al., 1979; Gares i Nordstrom, 1987).



**Figura 16** : Model teòric sobre l'evolució espai-temps de morfologies *blowout* existents en primer línia al sistema d'es Comú, Mallorca (Mir-Gual et al., 2013).

La lògica sinèrgia entre l'origen i la seva evolució fa que els agents responsables siguin els mateixos. No obstant, i com ja es mencionava amb anterioritat, la cadència

del procés dependrà de la intensitat i recurrència en que aquests agents actuïn. Amb aquest escenari els *blowouts* podran evolucionar i desenvolupar-se de diferents maneres, sempre atenent a la intensitat i direcció dels vents predominants i efectius, al tipus i abundància de vegetació, a la recurrència i força refractada per les tempestes de mar, o bé a l'estat de conservació de la primera línia de dunes. No obstant, sobretot en sistemes molt dinàmics des d'un punt de vista sedimentari, els *blowouts* poden adquirir dimensions importants, arribant a generar la formació de dunes parabòliques (Carter et al., 1990).

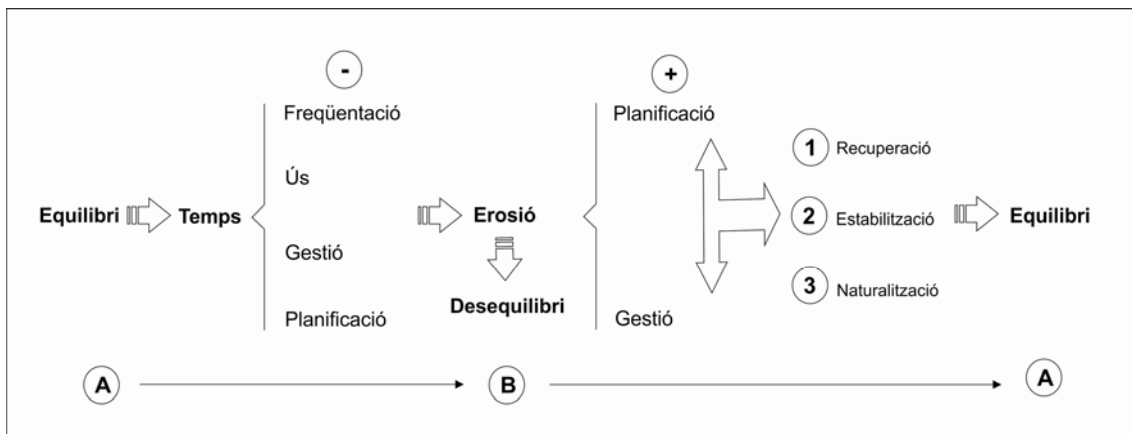
Mir-Gual et al. (2013), després d'analitzar 58 *blowouts* al sistema d'es Comú de Muro (Mallorca) indiquen que el màxim estat de fragmentació al llarg d'un front dunar no tan sols es pot trobar en l'anàlisi de les morfologies *blowout* a escala individual, sinó amb zones altament degradades a conseqüència de la evolució i fusió de morfologies inicialment simples, però que amb el temps han entrat amb coalescència amb altres originàriament diferents (Figura 16). Segons aquest model, l'evolució de *blowouts* – sense descartar cada un dels agents que en puguin generar la seva intensificació – pot derivar d'una morfologia simple unidireccional (estat 1), a una morfologia ramificada, amb diferents fronts d'evolució (estat 2), passant per a la coalescència amb un altre *blowout* limítrofe però amb origen diferent (estat 3), i acabant amb la formació d'una àrea altament fragmentada a causa de l'alta interconnectivitat de *blowouts* inicialment simples (estat 4). En aquest sentit, la Figura 17 mostra un exemple del pas entre l'estat 1 i el 3 ( de la Figura 16), en que la coalescència de dos *blowouts* simples amb diferent origen genera una zona de major erosió en la seva part interior i per tant, intensifica la vulnerabilitat del sistema dunar vers a un estat òptim de conservació.

Tal i com s'esmentava poc abans, la mà de l'home també ha de ser avui dia considerada com un dels agents modificadors en tant a l'estat de conservació dels sistemes dunars litorals. En emplaçaments com les Illes Balears, a on l'activitat urbanoturística s'ha desenvolupat de manera incessant sobre la franja costanera al llarg dels darrers decennis, amb èmfasi sobre les costes sedimentàries, la influència antròpica ha de ser altament considerada a l'hora de tractar els processos erosius en aquest ambients. Aquest fet no és absent quan parlem de *blowouts*, ja que en el nostre cas, sembla ser que la influència de l'home no ha estat gens despreciable. Tenint en compte aquesta incidència, i partint d'un estat d'equilibri (A), un alt ús i freqüentació a més d'una mala gestió i planificació pot dur de cap un estat d'erosió i desestabilització del front dunar (B), el qual incrementarà la possibilitat de nous *blowouts*. Des d'aquest punt, només de

la millora en la planificació i la gestió s'en podrà obtenir de volta una recuperació, estabilització, i en conseqüència, una naturalització (A) (Figura 18).



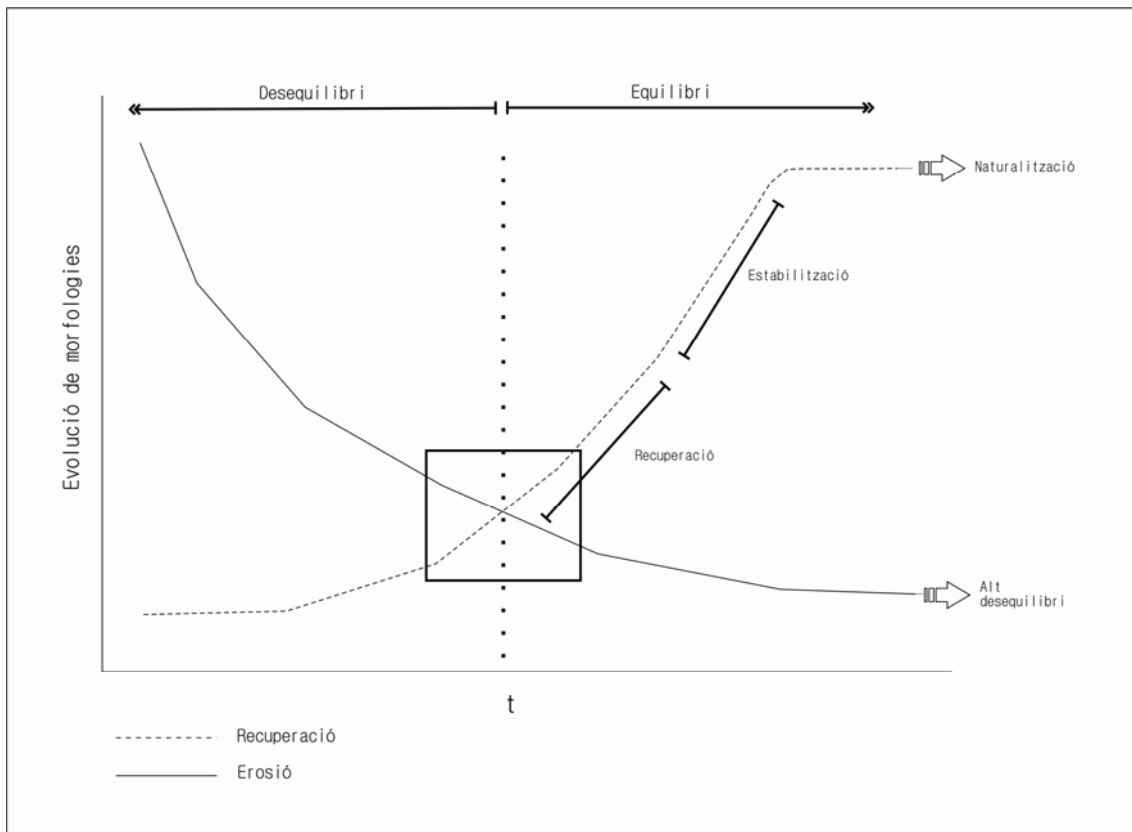
**Figura 17 :** Exemple real de coalescència entre dos *blowouts* originàriament diferents, i de la formació d'una àrea altament erosiva en la seva part interior (Cala Agulla, Mallorca).



**Figura 18 :** Esquema del procés d'evolució en l'estat de conservació i recuperació dels fronts dunars a partir de les variables d'ús i gestió.

En tant a l'evolució de les morfologies *blowout*, la variable temps, dependent també de la pressió soferta o de l'òptima gestió aplicada, serà important en tant al seu devenir. En aquest sentit la Figura 19 representa com partint d'una situació negativa, la manca de gestió conduirà cap a una situació d'alt desequilibri i per tant, cap a una

situació propensa a la formació i evolució de morfologies *blowout*. Del contrari, si a una situació negativa des del punt de vista de la conservació s'hi aplica un protocol de gestió òptim, aquesta pot revertir amb el temps cap a una situació d'equilibri que, passant per un procés de recuperació i estabilització, en podrà derivar amb una naturalització del primer cordó dunar.

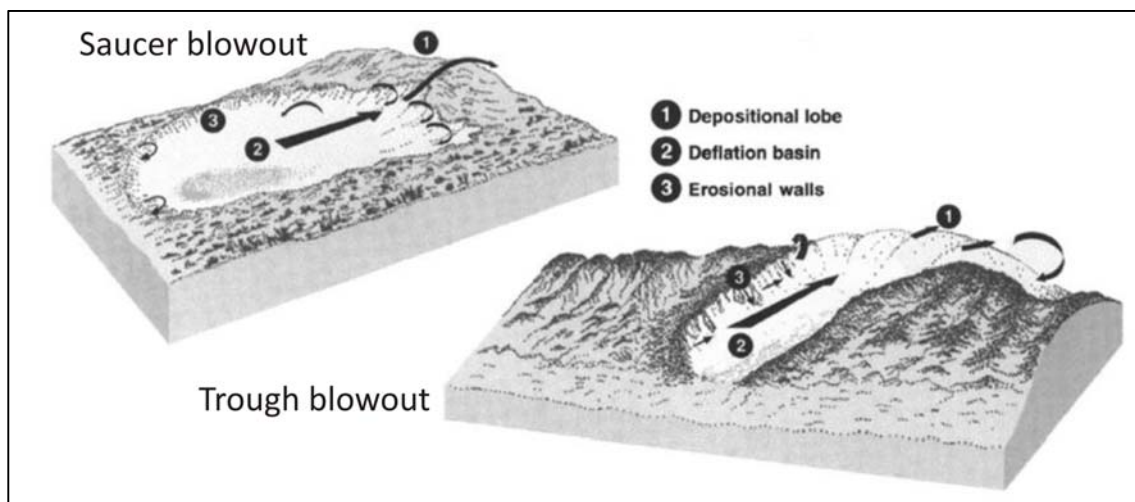


**Figura 19:** Esquema gràfic de l'evolució de les morfologies *blowout* a partir de les variables de gestió i temps. Una òptima gestió conduirà cap a un estat d'equilibri i naturalització de les morfologies erosives en qüestió, mentre que la manca de gestió (o una incorrecta gestió) pot conduir cap a una situació d'alt desequilibri, negativa pel devenir del sistema dunar en la seva integritat.

### 1.6.3. Tipologies i classificació de *blowouts*

L'intrínsec dinamisme associat als sistemes platja-duna, i en especial aquell que afecta a la primera línia de duna, fa que les morfologies *blowout* puguin sofrir una notable variabilitat tant en temps com en espai (Hesp, 2002). Amb aquest sentit pot ser es faci un tant difícil establir una classificació absoluta d'aquestes morfologies a partir de la forma que presenten. No obstant, dins de la literatura existent algunes en són les classificacions que, seguint patrons similars, estableixen algunes tipologies de *blowout*.

Smith (1960), i sense entrar en establir una classificació estrictament categòrica, afirmava que les morfologies *blowout* podien variar la seva forma des de petites formes circulars a formes perllongades, passant per grans canals de deflació o depressions de magnituds importants. Uns anys més tard Ritchie, (1972) ja establí una classificació més precisa a partir de la forma presentada per dites morfologies, diferenciant entre quatre tipus; a) *cigar-shaped*, *v-shaped*, *scooped hollow* (depressió còncaua), i *cauldron-corridor*. Tanmateix, Cooper (1958; 1967) establí una classificació més simple, basada únicament en dues tipologies, diferenciant entre *saucer* i *trough blowouts* (Figura 20). Sembla a ser que amb el temps aquesta classificació, posteriorment recolzada per altres autors tals com Hesp (1996; 2002) o Hesp i Walker (2013), tot i la seva senzillesa, ha estat la que més acceptació ha tengut dins la disciplina científica. De fet, i atenent al que afirma Hesp (2002), tot i poder existir un ampli ventall de morfologies en ambients eòlics litorals, la majoria de *blowouts* es poden acabar classificant dins de les dues categories primàries definides per Cooper (1958).



**Figura 20:** Diagrama esquemàtic (Hesp, 2002) de la classificació establerta per Cooper (1958) diferenciant entre *saucer blowouts* (grafia esquerra) i *trough blowouts* (grafia dreta).

Tal i com il·lustra la Figura 20, els *saucer blowouts* es defineixen per formes circulars, o semi-circulars, i normalment apareixen en plataformes superficials poc profundes. Altres tipologies tals com *cup* – o *bowl* – *shaped blowouts*, esmentades per autors tals com Hesp i Walker (2012) i Smyth et al. (2012) podrien quedar inserides dins d'aquesta mateixa tipologia. Per la seva banda els *trough blowouts* adopten una



forma allargada, en forma de corredor. La seva morfologia fa que siguin plataformes més profundes i amb parets laterals molt més escarpades, normalment amb una zona de deposició sedimentària en la seva part interior – lòbul de deposició – (Figures 20 i 21) (Hesp, 2002). Tanmateix però, la forma inicial, la seva mida i el seu posterior desenvolupament dependrà de diversos factors. Per exemple, Smith (1960) afirmava que els *blowouts* que es donin a les crestes de les *foredunes* seran normalment formes *saucer*, superficials, mentre que aquells que ho facin a la zona d'*stoss* (sotavent) s'associaran a formes més profundes i perllongades, tipus *trough*.

No obstant, i en condicions naturals, les morfologies *blowout* poden sofrir un ampli grau de variabilitat espacial i temporal. Com ja s'ha esmentat poc abans, l'evolució i el desenvolupament de dites morfologies dependrà de varis agents i factors (veure epígraf 1.6.2.), a més també de les condicions locals en les que es desenvolupin. Així doncs, recentment, autors com Mir-Gual i Pons (2011) i Mir-Gual et al. (2013) han afegit en les seves classificacions les condicions locals en les quals es desenvolupen les morfologies estudiades, determinant així els distints tipus a partir de les seves característiques geomorfològiques i ecològiques, i diferenciant també entre l'estructura i la forma presentada (veure més al capítol 3).

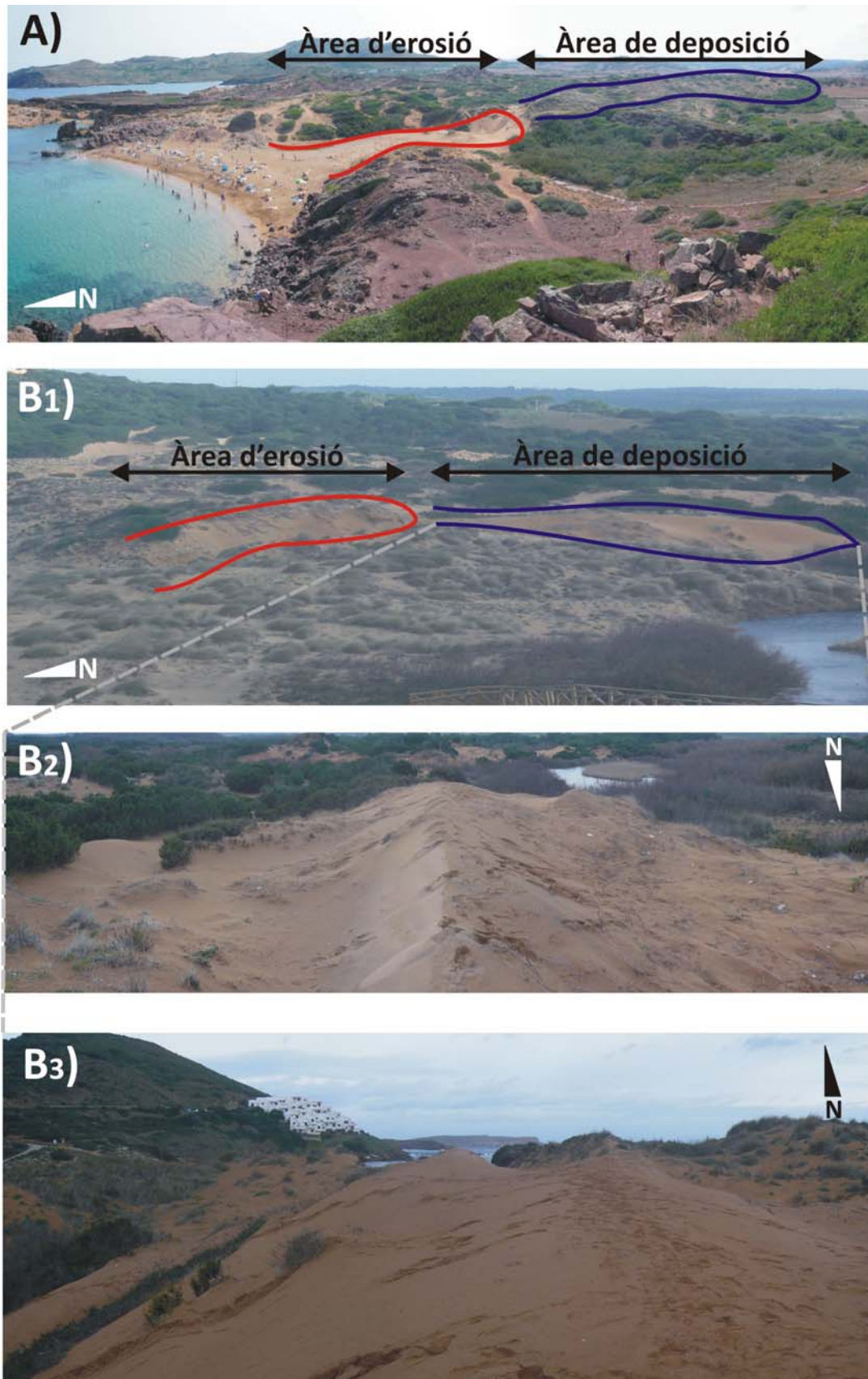
#### 1.6.4. Implicacions en la dinàmica sedimentària i geoambiental dels sistemes platja-duna

Si bé és cert que l'estudi de les formes *blowout* en sistemes sedimentaris litorals s'ha incrementat al llarg de les darreres dècades, aquest ha estat en la seva gran majoria des d'una perspectiva individualitzada i puntual. No obstant, avui encara en manca informació de les conseqüències que de la seva formació i desenvolupament en poden derivar en tant a l'equilibri i estat de conservació de tot el sistema dunar associat. Alguns autors, de passada i de manera subtil, n'han fet alguna referència al respecte. Hugenholtz i Wolfe (2009) suggereixen que els *blowouts* – entesos com a morfologia – esdevenen els precursors a l'hora d'entendre la dinàmica de les dunes, i que en conseqüència, un increment en l'estudi de la dinàmica eòlica i sedimentària en *blowouts* ajudarà a entendre millor els processos de reactivació en dunes estabilitzades o semi estabilitzades. D'aquesta manera, els autors deixen entreveure que el desenvolupament de morfologies erosives no s'ha de considerar, tampoc, com un fet aïllat dins el funcionament integral del sistema a on es desenvolupen, sinó que els seus efectes

sinèrgics poden tenir conseqüències considerables per a la integritat del mateix. Bate i Ferguson (1996) apunten que la formació de *blowouts* facilita l'entrada de vent dins del camp de dunes posterior. Així doncs, si es considera el vent com un dels principals agents modelitzadors en sistemes sedimentaris litorals, cal entendre que aquest fet tindrà conseqüències en el devenir del camp de dunes existent a la part posterior dels *blowouts* en formació. L'existència d'aquestes plataformes erosives – com a conductes canalitzadors –, ajudades de l'existència de vents efectius des del punt de vista sedimentari – entesos com l'agent mecànic responsable –, facilitaran aports d'arena “fresca” de cap l'interior del sistema (van Boxel et al., 1997), fet que el reactivarà i en suposarà canvis geomorfològics a tenir en compte. Tal i com esmenten Gares i Nordstrom (1995) aquests processos han estat observats per altres autors tals com Cooper (1958) i Wiedemann (1990) en sistemes d'Oregon i Washington als EEUU respectivament, Landsberg (1956) a Dinamarca, o Barrere (1992) a França.

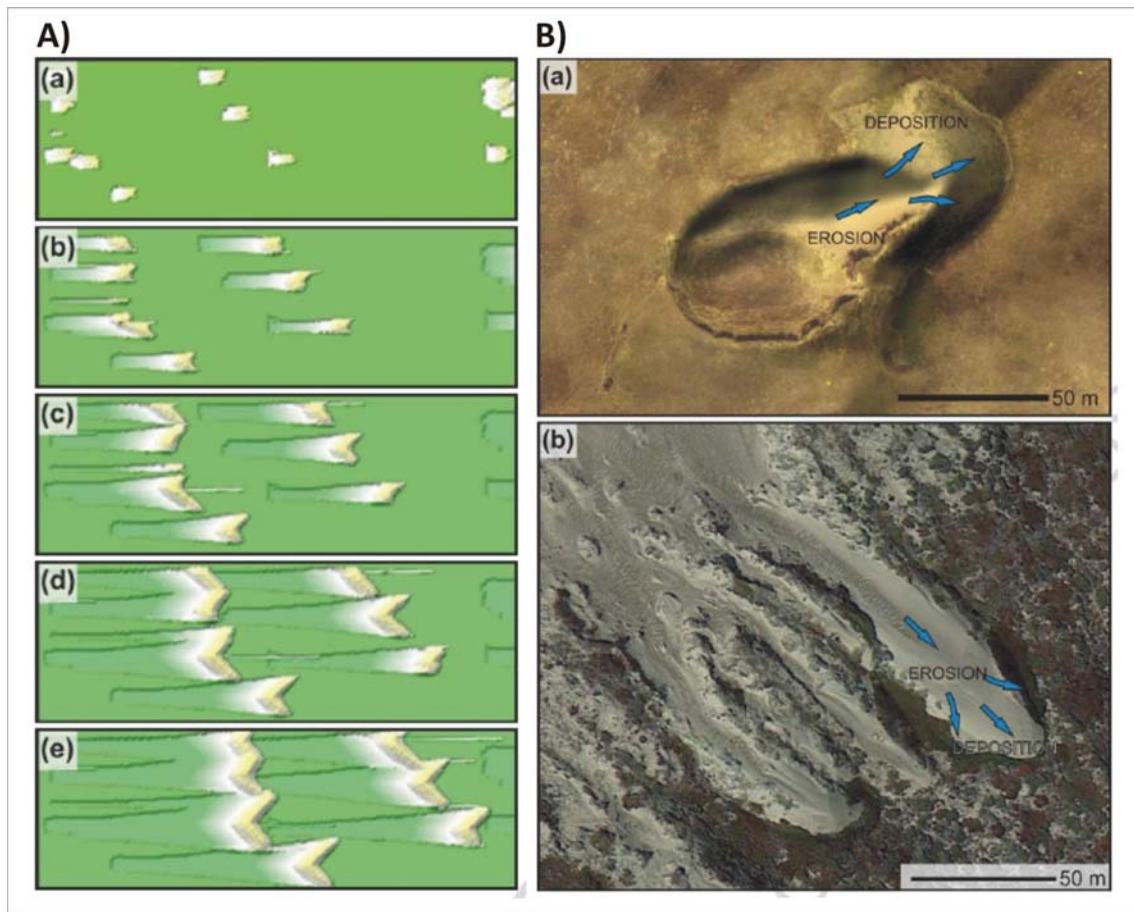
Un altre fet que dona pistes sobre les implicacions que la generació de dites morfologies pot tenir sobre la resta del sistema és la teoria basada en el lòbul de deposició format en la part posterior de la plataforma erosiva, explicat en epígrafs anteriors, i defensada per autors com Glenn (1979), Carter et al. (1990) o Hesp (2002). En aquest sentit, l'existència d'una àrea caracteritzada per l'erosió sedimentària – cubeta de deflació – deriva amb una zona de deposició la qual, a partir de processos de sedimentació, genera morfologies positives, inclús la formació de noves dunes parabòliques (Figura 21).

Aquest binomi erosió-sedimentació també té conseqüències des del punt de vista vegetal. La forta incidència de vents a llarg de la plataforma d'erosió dificulta, degut l'alt input energètic, el creixement massiu de vegetació, de manera que a la zona deposicional, amb aportació recurrent de sediment, succeeix el contrari – l'alt aport sedimentari dificulta el creixement de vegetació, o bé, simplement enterra la vegetació incipient que en pugui néixer – (veure Figura 21 B<sub>1</sub>, B<sub>2</sub> i B<sub>3</sub>). En aquest sentit Smyth et al. (2012) conclouen que la cubeta de deflació, degut a l'alt poder erosiu al que està exposada és la darrera part del *blowout* en vegetar-se .



**Figura 21:** Vistes panoràmiques de Cala Pregondó (A) i Cala Tirant (B<sub>1</sub>), al N de Menorca, on s'exemplifica la implicació sedimentària que un *blowout* en primera línia pot tenir en tant a la integritat del sistema. Les imatges B<sub>2</sub> i B<sub>3</sub> són imatges de detall del lòbul de deposició del *blowout* de cala Tirant (B<sub>1</sub>), les quals exemplifiquen gràficament les morfologies positives formades gràcies als processos de deposició sedimentària.

Amb els processos anteriorment descrits, l'existència de *blowouts*, sens dubte, pot jugar un paper important en la reactivació de sistemes dunars, per exemple fixats per una cobertura vegetal considerable. Tant és així que autors com Barchyn i Hugenholtz (2013) proposen un model conceptual de reactivació de sistemes dunars a partir de l'obertura de *blowouts*. Aquests autors parteixen de la importància en tant a la cobertura vegetal existents, ja que d'aquesta dependrà de si parlem de dunes actives, o de dunes estabilitzades. Tal i com mostra la Figura 22A, el model proposat per Barchyn i Hugenholtz (2012) simula com la destrucció de vegetació en algunes zones fixades (a) suposa la reactivació sedimentària del sistema (b) i que, a partir de la formació de *blowouts* i de la seva posterior evolució (c), aquests poden entrar en interacció amb altres (d, e), suposant una reactivació en el conjunt del camp dunar.



**Figura 22:** A) Model de reactivació de sistemes dunars proposat per Barchyn i Hugenholtz (2012) a on des d'un estat fix (vegetat) la generació de zones lliures a partir de la destrucció de vegetació (a) pot derivar en la reactivació de tot el sistema a partir de l'evolució de *blowouts* terra endins, fins arribar a un sistema altament actiu (d, e). B) Exemples similars als mostrats per la Figura 21 A i B<sub>1</sub>, a on es distingeix la zona d'erosió i la zona de sedimentació associada a la formació i evolució de *blowouts*. Exemple de Morro Bay, CA, USA (Barchyn i Hugenholtz, 2013).

Les vistes aèries mostrades per la Figura 22Ba i Bb exemplifiquen que els processos de sedimentació derivats de la formació i evolució de *blowouts* deriva amb importants aports sedimentaris de cap a la seva part interior. Aquest fet, tal i com reflecteixen les imatges, pot suposar canvis substancials passant d'un sistema vegetat – per tant d'un sistema fix i inactiu – a un sistema totalment dinàmic. Amb aquest escenari es palès doncs, que l'existència de morfologies erosives suggereix pensar amb alteracions ecològiques i geomorfològiques per a la resta del sistema.

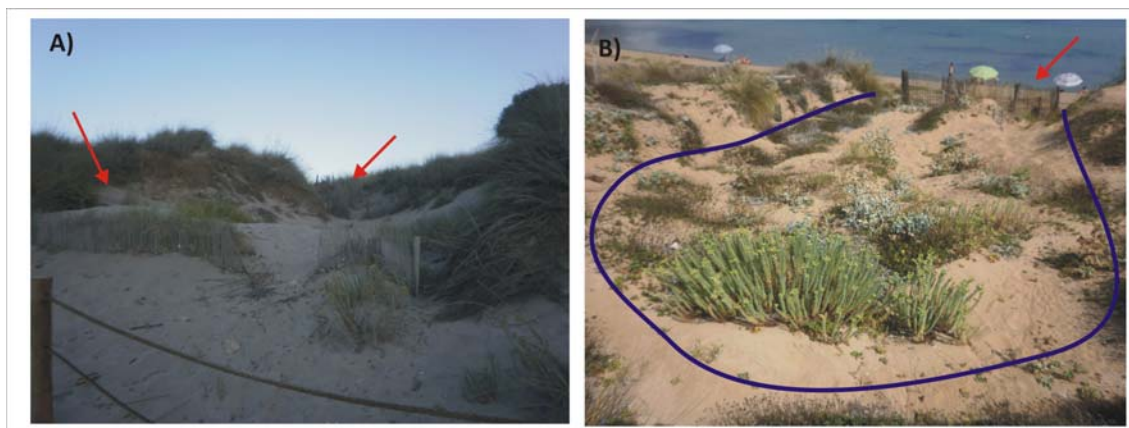
No obstant, les opinions referents als efectes positius que pot tenir l'existència de *blowouts* vers a la reactivació de sistemes dunars fixats per vegetació poden ser força divergents. Com ja ha estat esmentat en més d'una ocasió, en algunes regions costaneres del món, dotades d'unes condicions climàtiques òptimes i una geolocalització estratègica, la costa en general, però en concret les costes sedimentàries, s'han convertit en pols d'activitat urbano-turística de magnituds considerables, i per tant, zones amb uns interessos socials i econòmics molt potents. En aquest sentit doncs, es tenen evidències que al llarg de les Illes Balears (Roig-Munar et al., 2009c; Mir-Gual et al. 2010) i també de la Mediterrània (Quézel i Médail, 2003), amb èmfasi sobre el llevant espanyol (Escarré et al., 1989; Ortuño, 1990; Baeza et al., 1991; Pastor-López i Martín-Martín, 1993; Olivera et al., 2003) hi ha hagut importants processos de reforestació de sistemes dunars amb l'objectiu de fixar-los i així no impedir el desenvolupament d'altres activitats socio-econòmiques més productives, com en puguin ser l'agricultura o el devenir de la indústria turística.

Des d'aquesta perspectiva, i posant com exemple el cas de les Illes Balears, pot ser que la tendència a seguir sigui la contrària a l'establerta per autors tals com Barchyn i Hugenholtz (2012; 2013). En el cas insular, la gran importància dels sistemes platja-duna recau principalment en la zona que avarca la platja emergida. No obstant, aquesta, deguda la forta pressió antròpica soferta al llarg dels anys, avui soporta severos problemes d'erosió arreu de l'arxipèlag (Roig-Munar et al., 2012). Si es pren doncs com exemple un sistema amb certes condicions naturals – entenem per condicions naturals aquells sistemes que encara comptin amb la gradació natural dels sistemes platja-duna (Figura 11) – però amb problemes de disposició sedimentària sobre la platja emergida, l'interès no passa per a generar la formació de *blowouts* i posterior reactivació del sistema dunar consolidat, sinó al contrari. Des d'aquest punt de vista doncs, l'interès passarà per fixar, segellar i estabilitzar els *blowouts* existents – sobretot

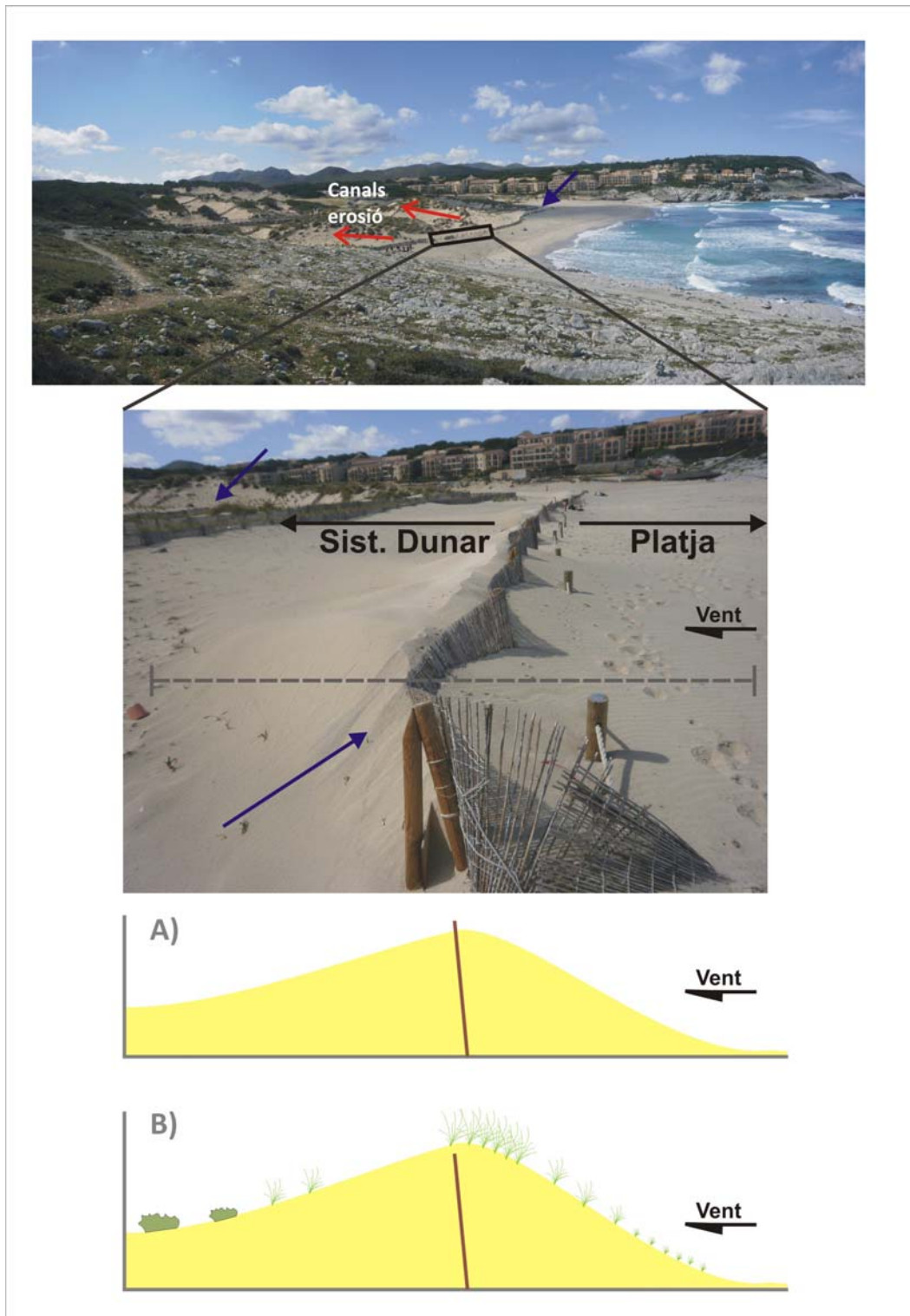
aquells localitzats a la primera línia de dunes – i així evitar el transport sedimentari des de la platja alta cap al interior del sistema consolidat – disminuint la taxa d’erosió – .

#### 1.6.5. La intervenció en les morfologies *blowout* com a mesura de gestió

Per a tal de disminuir les taxes d’erosió sedimentària de la platja emergida una òptima gestió de la primera línia de dunes esdevé clau en tant a mantenir els balanços sedimentaris per a la seva correcta conservació. Tenint en compte les implicacions geomorfològiques que la presència de *blowouts* poden tenir en la integritat del sistema (ja explicades a l’epígraf 1.6.4.) es postularà com a mesura necessària interferir, primer en evitar la seva formació i segon, en la seva evolució. És per aquest motiu que avui dia, sobretot en el cas de l’illa de Menorca, no és difícil trobar diferents exemples d’intervenció sobre el règim sedimentari en morfologies *blowouts*, sobretot en aquelles existents en primera línia. Si bé és cert que varies en són les possibles accions a executar, s’ha de tenir en ment la fragilitat d’aquests sistemes i per tant, en responsabilitat s’ha de procurar intervenir atenent a tals circumstàncies.



**Figura 23:** Exemples en tant a l’aplicació de mesures de gestió blanques vers a la interferència de la dinàmica sedimentària dins morfologies *blowout* a partir de la instal·lació de trampes d’interferència eòlica; A) multi-disposició espacial de trampes (fletxes vermelles), incrementant la resistència als vents predominants i interferint en el conseqüent transport sedimentari (La Vall, Menorca), B) exemple de reblliment sedimentari d’una morfologia *blowout* (àrea marcada en blau) i la posterior colonització vegetal per espècies herbàcies (Cala Tirant, Menorca).

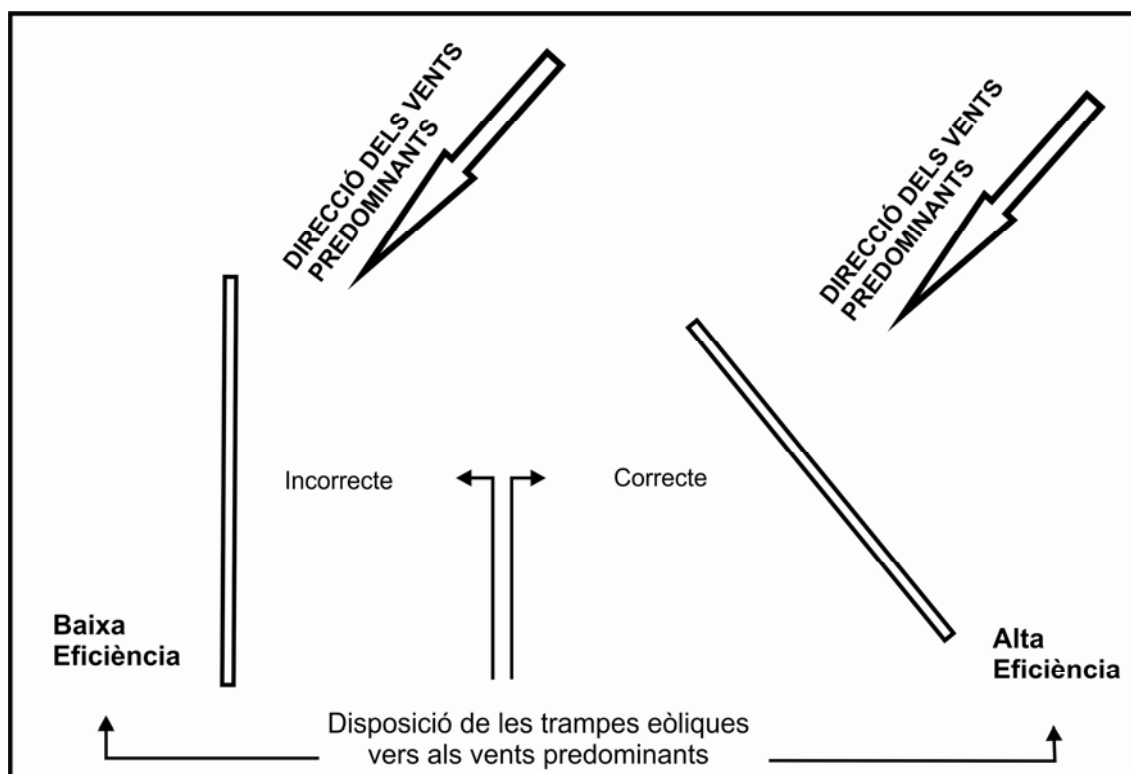


**Figura 24:** Exemple de la intervenció (2007) duta a terme al llarg de la primera línia de duna a Cala Mesquida (Mallorca), i de les seves implicacions geomorfològiques, derivant-ne la formació d'una primera línia de duna fins fa pocs anys inexistent. A l'esquema inferior; A) retenció sedimentària deguda la interferència de la trampa, i B) revegetació natural de la primera línia.

Les implicacions, ja explicades, que les morfologies *blowout* poden tenir sobre la resta del sistema fan que siguin claus i prioritàries a l'hora d'intervenir. La Figura 23 mostra dos exemples en els que, a partir de la interferència de la dinàmica sedimentària

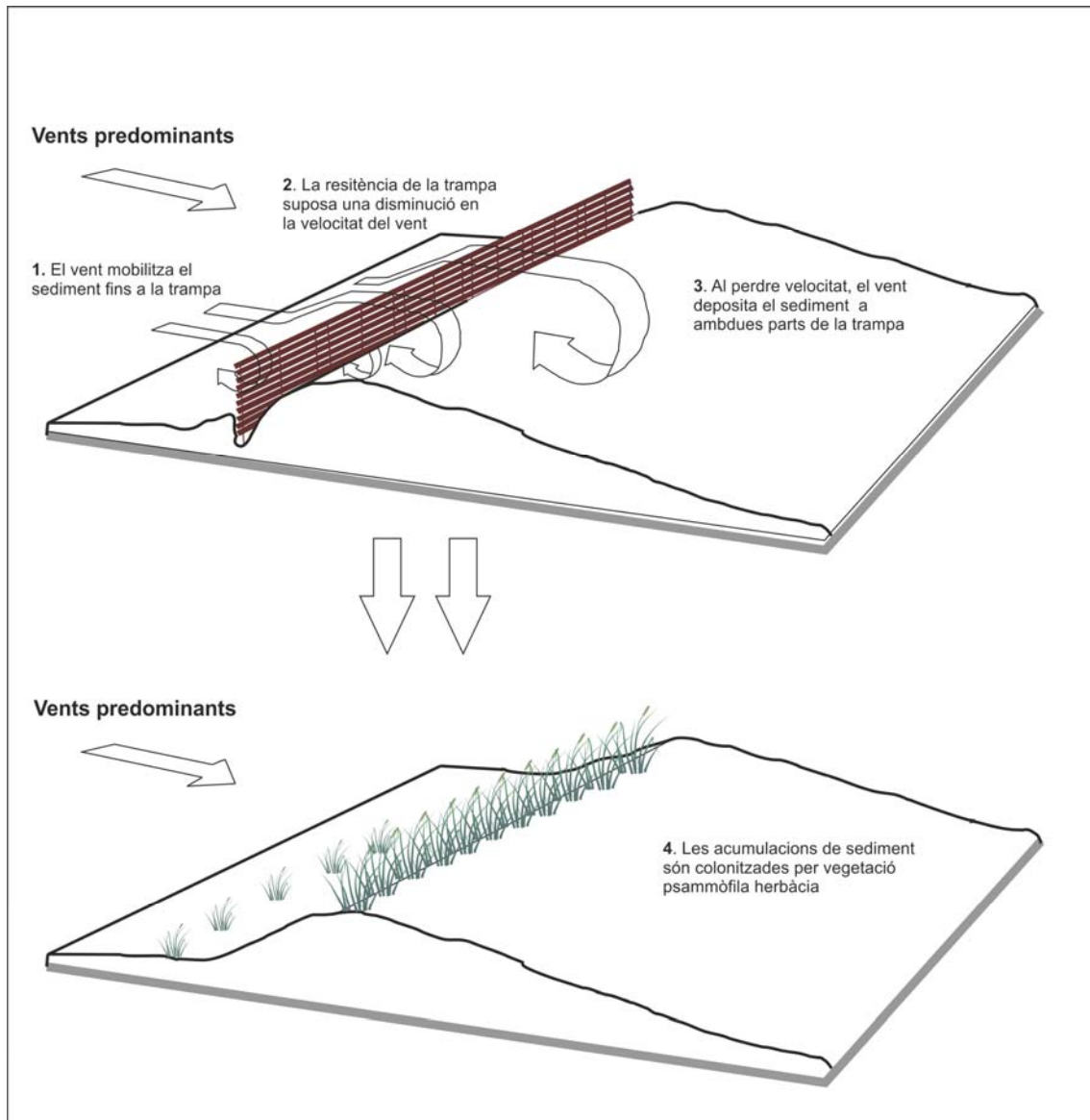
mitjançant la disposició de trampes, han sofert un rebliment sedimentari i ecològic que suposarà una major resistència a que el sediment provinent de la platja alta emigri de cap a l'interior del sistema consolidat i per tant, disminuirà el balanç sedimentari negatiu per a la platja emergida.

En sistemes dunars més dinàmics, i amb una gradació topogràfica més suau, la intervenció integral en el seu front serà clau també per a interferir amb els balanços sedimentaris negatius de la seva platja alta. La Figura 24 representa la intervenció duta a terme en el cas de Cala Mesquida (Mallorca). Aquest, al ser un sistema controlat en bona part pel marc estructural en el que està inserit, representa un sistema altament dinàmic (es veurà en l'apartat 3.1.3.). La intervenció al llarg del seu front ha fet que, al llarg dels darrers anys, la instal·lació de trampes d'interferència eòlica – assenyalades en blau a la Figura 24 – hagi suposat una tendència de retenció sedimentària important, ajudant doncs a la formació d'una primera línia de duna – esquema A i B de la Figura 24 – que ajudarà a retenir i incrementar la disposició sedimentària per a la seva platja alta, i disminuir així les seves tasses erosives.



**Figura 25:** Representació esquemàtica sobre l'eficiència de les trampes d'interferència sedimentària en funció de la seva disposició i orientació vers a la incidència dels vents predominants (Mir-Gual, 2011).





**Figura 26:** Representació gràfica dels efectes geomorfològics i ecològics de les trampes d'interferència eòlica en la primera línia de dunes (Mir-Gual, 2011).

Si bé és cert que en el cas d'emplaçaments tals com les Illes Balears és important intervenir en les morfologies erosives existents en primera línia i així evitar balanços sedimentaris negatius per a la platja emergida, les mesures de gestió aplicades per a l'obtenció de tal objectiu s'han de planificar i executar enfocant-les de cap a la seva màxima eficiència i sostenibilitat. Com ja ha estat esmentat, la disposició de trampes d'interferència eòlica és una de les mesures més recurrents al llarg de les nostres platges. La importància d'aquestes però, no recau tant en el material amb el que estan fetes, sinó amb la seva orientació i disposició vers als vents incidents i efectius. En aquest cas, tal i com il·lustra la Figura 25, el grau d'eficiència d'aquestes només serà òptim quan es disposin perpendicularment a la direcció dels vents efectius. Amb tal

propòsit, la intervenció a partir de trampes de retenció sedimentària ha d'anar acompanyada d'un coneixement previ dels vents incidents i efectius sobre el sistema o morfologia sobre el qual s'actua.

Tal i com es reflecteix a la Figura 26, donant perpendicularitat a la orientació de les trampes vers a la direcció dels vents predominants s'incrementarà la capacitat d'aquestes a l'hora de retenir el sediment transportat pel propi flux eòlic. És d'aquesta manera com es començaran a percebre les connotacions geomorfològiques derivades primer, i que amb el temps seran acompanyades d'una colonització vegetal que, de manera natural, ajudarà a potenciar la retenció de sediment en primera línia i la disminució dels patrons erosius en la platja emergida.

### **1.7. La gestió dels sistemes dunars i la primera línia de costa envers a la seva vulnerabilitat. El cas de les Illes Balears**

La situació de les Illes es podria definir com exemple paradigma a l'hora de parlar de gestió litoral, bé per les accions que s'han vengut desenvolupant al llarg dels anys, o bé per la manca d'aquestes. El que és cert però, que les Balears, sobretot Mallorca i Eivissa, han esdevingut un nucli turístic de primer nivell a escala europea, sobretot des de l'explosió turística a principis de la dècada dels seixanta, amb el *1er boom turístic* (Rullan, 1999), arribant als 15 milions de passatgers arreu de les Illes Balears al 1972 (Blázquez i Murray, 2010).

La transformació territorial que de la mà del turisme ha viscut Mallorca especialment, però també la resta d'illes, no es pot deslligar dels tres *booms* de creixement turístic experimentats al llarg de la segona meitat del segle XX (Rullan, 2002). El medi de les Illes, i la seva situació geogràfica i climàtica, va predeterminar, des del principi, la franja costanera com a base d'operacions de l'activitat turística, sent aquesta la responsable del canvi d'imatge que s'ha anat confeccionant i polint al llarg del temps. Les costes insulars es van veure greument alterades al llarg del primer i el segon *boom*, amb una tendència de creixement sense sostre pel que respectava a les urbanitzacions turístiques litorals, sense planificació alguna, i mai tenint en compte els potencials efectes negatius que podien jugar sobre el medi físic (Rullan, 2007). Tot i que la transformació territorial s'ha expandit arreu, com ja ens esmentava Quintana (1978), la importància creixent del turisme a mitjans del segle passat va conduir a valorar notablement els emplaçaments turístics des d'un punt de vista social i econòmic.

Quintana (1978) segueix remarcant el poder que des del principi el sector hotelier va tenir, sobretot a l'hora de promoure i impulsar infraestructures turístiques arran de costa, tot d'acord amb el producte que es volia vendre.

A part de les condicions de localització dins la Mediterrània occidental i les característiques climàtiques, el fet de que ja hi hagués un certa tradició d'estiueig i un determinat nivell d'infraestructura, afavoria la construcció del territori turístic (Rullan, 2002). La dotació d'aquestes infraestructures, i sòl barat i fàcil topografia, van esdevenir criteris claus per ser la localització preferent dels grans complexos hotelers de la dècada dels seixanta (Quintana, 1978).

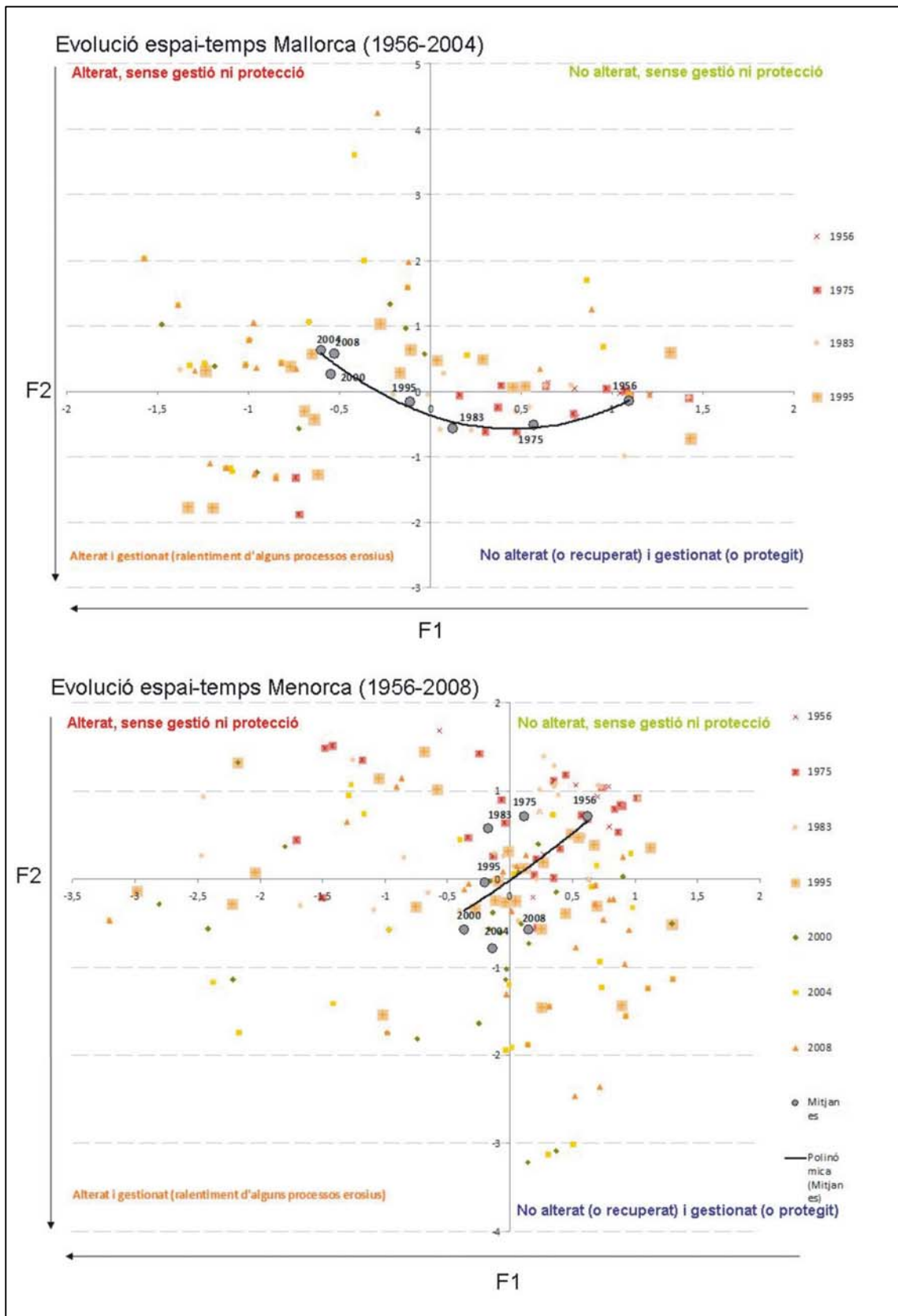
Però del territori que ens definia Quintana (1978) a la dècada dels setanta en queda poc, o si més no, alguns canvis substancials s'han produït. Rullan (2002) afirma que a Mallorca, des d'ençà a ara s'ha esdevingut una variació quantitativa interessant, referint-se a la capacitat de càrrega suportada per tota l'estructura, passant, entre residents i turistes en temporada alta, d'unes 800.000 persones cap a 1970 (sobre els 210 hab./km<sup>2</sup>), als 1.200.000 a les portes de l'any 2000 (320 hab./km<sup>2</sup>). Tot això fa pensar que aquests canvis quantitius han dut subordinats variacions qualitatives que han afectat al territori de les Illes Balears, però molt especialment a les seves zones costaneres, degut al fenomen definit com *litoralització* o *terciarització* de l'economia balear.

Aquesta tendència ha provocat canvis molt importants a la fisonomia natural de les costes mallorquines, amb èmfasi sobre les costes deprimides d'acumulació. A més, les diferents pràctiques i actuacions dutes a terme prop de l'àmbit litoral, en molts casos han acabat manifestant-se amb la destrucció total dels sistemes dunars, impulsant mesures com les regeneracions artificials de platges i creant-ne una dependència (Rodríguez-Perea et al., 2000), o donant vida a l'artificialització que s'ha repetit de forma generalitzada pels espais turístics (Roig Munar et al., 2009). Com a conseqüència, i degut a la forta ocupació del litoral arenós, en els espais turístics s'han produït un considerable nombre de transformacions, modificant l'estat natural originari d'aquests espais. Aquests canvis han estat resultat de, bé la interrupció dels mecanismes naturals de defensa, o bé per la generació de nous espais arenosos mitjançant la creació de platges artificials (Roig Munar et al., 2009). En el cas de les Illes Balears, l'ocupació de la costa ha estat massiva i acultural des de dècades enrere, amb un procés de massificació accelerat (Roig Munar i Comas Lamarca, 2005).

Malauradament, gran part de les mesures de gestió que s'han aplicat sobre les costes balears al llarg dels darrers decennis han respost, única i exclusivament, a les demandes de la indústria turística per tal de satisfer cada un dels seus subjectes. Parlem de la neteja mecànica de les platges per la retirada de la *Posidonia oceanica*, o de la deposició de sediment exogen a platges erosionades, entre d'altres. Tot junt, ha ajudat a agreujar més l'efecte negatiu sobre l'erosió de les platges, i els balanços sedimentaris i geoambientals en els sistemes platja – duna (Martín-Prieto et al., 2007).

La inèrcia econòmica i els sucosos beneficis de la indústria turística no han permès veure als agents responsables les platges i els sistemes dunars com ambients fràgils i naturals, sinó que sempre, des del principi, s'han associat a emplaçaments estrictament necessaris per sustentar el monopoli turístic i les infraestructures associades. Aquesta errònia i desvirtuada visió no es pot interpretar d'altra manera sinó des del prisma socioeconòmic. I com no podia succeir d'altra forma, d'una visió errònia n'han sorgit actuacions també equivocades. Així, a l'hora d'actuar en la gestió dels sistemes platja – duna, pel que es refereix a la seva recuperació, no s'ha fet mai des d'un punt de vista transversal, i molt menys integrat. Roig Munar et al. (2009) afirmen que un dels problemes en la gestió de la costa fins al moment, és que aquesta s'ha abordat des d'un prisma focalista, ignorant la influència decisiva dels agents i forces que han intervingut en el transport de sediment dins de l'ample sistema litoral. S'ha tendit a dividir el sistema en sectors (zona submergida - platja alta - sistema dunar), sense connectar-los entre sí, i sense pensar amb la necessitat que cada part té de l'altra. Com a conseqüència, s'han solucionat local i temporalment alguns problemes, mentre d'altres s'han accentuat (Martín Prieto et al., 2007). Definitivament, l'espai de la platja s'ha entès com un servei a oferir, i no com un sistema natural. Ha estat aquesta capacitat de satisfer les necessitats empresarials, polítiques i humanes la que ha transformat els atributs de la naturalesa litoral en recurs, convertint aquests espais en una cosa relativa, subjectiva i merament funcional, simple (Roig-Munar i Comas Lamarca, 2005).

Les conseqüències directes de tot el procés explicat anteriorment no han estat de bades per a l'estat de conservació dels sistemes dunars illencs. Roig-Munar (2011) fa un repàs de la situació i evolució espai-temps dels sistemes dunars a les Illes Balears a partir de la seva valoració en tant a l'aplicació de criteris geomorfològics vers a la seva gestió. Així doncs, aquesta esdevé la primera cita empírica referent a l'evolució dels sistemes platja-duna a les nostres illes a partir de les mesures de gestió aplicades en el seu devenir.



**Figura 27:** Evolució espacio-temporal dels sistemes platja-duna de Mallorca; 1956-2004 (a d'alt) i Menorca; 1956-2008 (a baix) a partir de l'aplicació de criteris geomorfològics en la seva gestió (Roig-Munar, 2011).

La valoració que en fa Roig-Munar (2011) es basa en fer un repàs cronològic de l'estat de conservació dels sistemes dunars des d'una situació pre-turística (1956) fins a l'actualitat, tot relacionant-la amb la pressió antròpica i les mesures de gestió aplicades, tenint com a referències d'anàlisi les característiques geomorfològiques dels propis sistemes.

Tal i com es reflecteix a la Figura 27, centrada amb els casos de Mallorca i Menorca – les dues illes estudiades per la tesi que es presenta –, existeixen diferències rellevants a tenir en compte. En el cas de Mallorca (Figura 27, part superior) es veu com la tendència dels sistemes dunars vers al seu estat de conservació des de l'arribada del turisme ha estat notablement negativa. Així, al 1956 es parteix quasi de sistemes dunars no alterats i sense gestió necessària, i amb els anys s'avança cap a sistemes no alterats/alterats però sota una gestió, arribant a la situació actual, caracteritzada per sistemes generalment alterats, sense gestió ni protecció. El cas de Menorca (Figura 27, part inferior) difereix substancialment del cas anteriorment exposat. Així, en aquest cas, al 1956 els sistemes parteixen d'una clara situació de naturalització. L'arribada de l'activitat turística i la seva derivada pressió tenen efectes sobre l'estat de conservació dels mateixos. No obstant, i a conseqüència de la gestió engegada en el cas menorquí, s'aprecia com la tendència passa per a sistemes alterats i gestionats (2000 i 2004) per a arribar a la situació actual, a on ens trobem generalment en sistemes no alterats (o recuperats) i gestionats.

D'aquesta manera doncs, l'anàlisi de Roig-Munar (2011) permet veure d'una manera empírica com l'aplicació de mesures de gestió enfocades a les característiques geomorfològiques dels propis sistemes platja-duna poden tenir efectes positius en tant a la seva evolució i estat de conservació. Només així es pot explicar que dues illes contigües hagin experimentat comportaments distints sota la força dels mateixos processos modificadors.

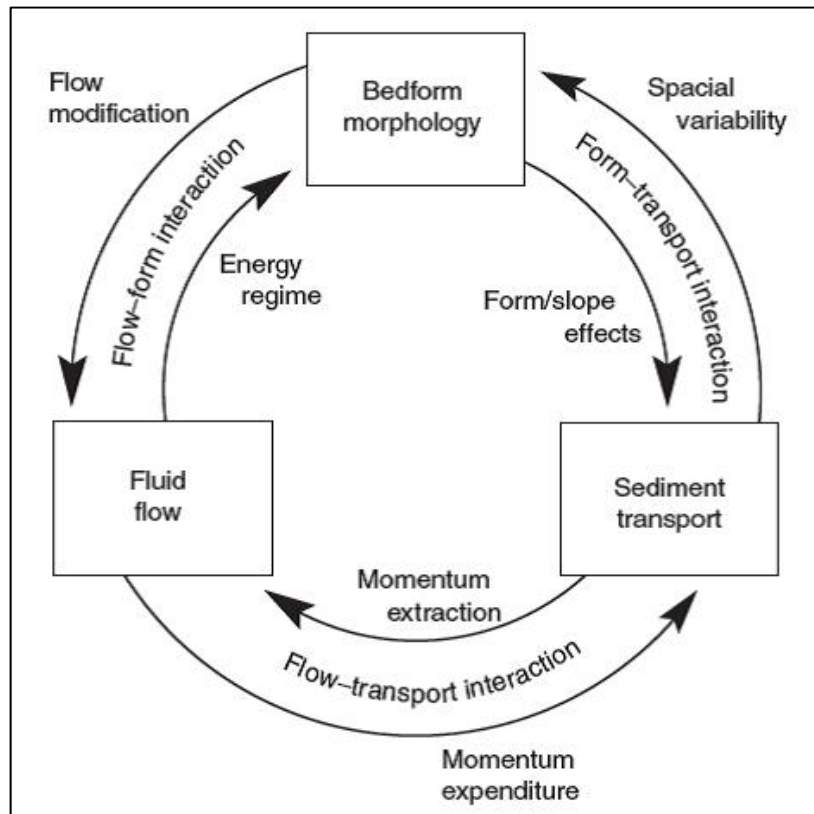
### **1.8. El vent: variable atmosfèrica i agent modelador dels ambients litorals sedimentaris**

En els camps de dunes litorals, principalment a les costes baixes, el vent pot convertir-se en un factor de primer ordre, ja que el transport eòlic esdevé un agent de gran magnitud en el subministrament o en l'efecte imbornal dels sediments, sent

especialment important en els indrets del litoral on s'hagin donat significatius processos de sedimentació i posterior formació de camps dunars. És així que la gènesi dels sistemes dunars, així com la seva disposició i orientació, són producte de l'actuació d'un flux eòlic, per la qual cosa la seva caracterització n'és un aspecte clau a l'hora d'estudiar-los i analitzar-los (Hernández-Calvento, 2002). Autors com Pethick (2001) afirmen que, en el cas de litorals d'acumulació, el moviment de les partícules d'arena dins l'aire configura un procés extremadament complex, però que necessàriament s'ha de comprendre si es vol entendre per complet el procés de formació i la morfologia del camp dunar. Els sistemes de platja eixuta constitueixen unes superfícies d'arena perfectes perquè, quan es donin les condicions idònies, el vent mobilitzi el sediment i el transporti sistema endins. Els resultats morfològics d'aquest procés són notables degut a la formació de morfologies arenoses d'acumulació – dunes –. Tals morfologies eòliques, que s'estenen per darrera la platja alta, evolucionaran terra endins formant els camps de dunes. L'efecte del vent pel que respecta a la seva capacitat de mobilitzar i construir formacions arenoses dependrà de la seva velocitat, i d'altres factors com la mida de gra, la forma d'aquesta, i la presència de vegetació psammòfila, entre altres.

L'estudi i la modelització de les condicions eòliques atmosfèriques a sobre dels camps de dunes litorals ha avançat considerablement al llarg dels darrers decennis, degut principalment a l'avanç sobre els coneixements teòrics dins el camp de la climatologia en referència al comportament del flux eòlic, així com també conseqüència de l'avanç i millora de la instrumentació de mostreig, la simulació i experimentació en túnels de vent i, més recentment, a la modelització de fluids, *Computational Fluid Dynamics* – CFD – (Walker i Hesp, 2013). L'avanç vers al comportament del vent com a agent, es percep que aquest no s'ha donat en la mateixa mesura quan ens referim a les implicacions morfodinàmiques que se'n poden derivar a llarg termini sobre els complexos de dunes. El que està clar és que la interacció entre el flux eòlic, el transport sedimentari i la morfologia dunar és complexa, endemés de notablement dinàmica des d'una perspectiva espacio-temporal. Inicialment la recerca es centrà en l'estudi sobre els efectes del flux eòlic a la cara sotavent de la duna – *stoss* – (e.g. Tsoar, 1978, 1982, 1985; Rasmussen, 1989; Nickling i McKenna Neuman, 1999, entre altres) i en franges de *foredune* vegetades (Hsu, 1977; Hesp, 1981, 1983, 1989). D'aquesta manera, fins fa relativament poc temps, l'existència i conseqüències de fluxos secundaris eren notablement desconeguts pel que respecta a les seves implicacions geomorfològiques. Així, la tendència actual s'ha centrat també en estudiar la cara de sobrevent de la duna –

lee – i dels fluxos secundaris existents, tot per incrementar el coneixement sobre els seus efectes des del punt de vista geomorfològic (e.g. Nordstrom et al., 2006; Walker et al., 2006; Lynch et al., 2008, 2010; Jackson et al., 2011; Hesp i Walker, 2012; Smyth et al., 2012).



**Figura 28:** Interaccions entre el flux eòlic i els patrons de transport sedimentari en sistemes dunars (Walker i Hesp, 2013).

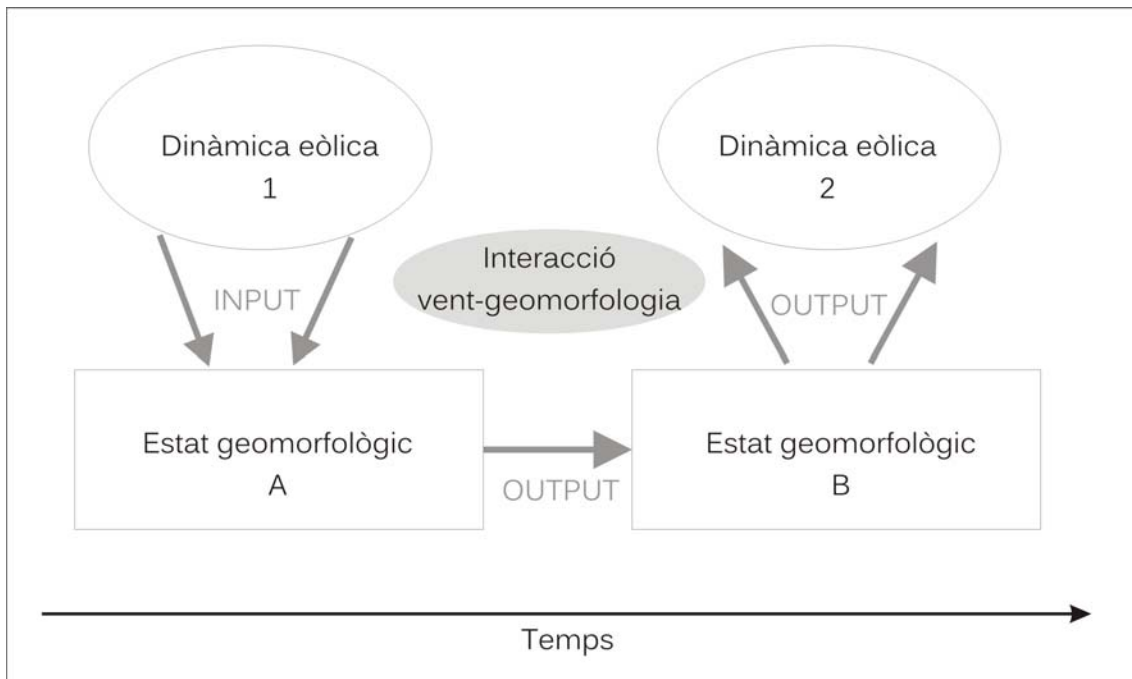
### 1.8.1. Interacció entre el flux eòlic i el transport sedimentari en sistemes dunars

La transferència de massa i energia que suposa la formació i el manteniment dels sistemes dunars litorals es dona a partir de complexes interaccions entre el flux eòlic, la morfologia i rugositat del terreny existent, i el transport de sediment derivat. D'aquesta manera el flux eòlic provindrà de la moció necessària per a remobilitzar i transportat el sediment existent (Figura 28). No obstant, els patrons de transport sedimentari variaran i dependran en funció d'algunes condicions a tenir en compte; a) la freqüència i magnitud dels principals vents efectius, b) factors limitadors pel transport, tals com la humitat del sòl o un alt grau de cobertura vegetal (Walker i Hesp, 2013). Sigui com sigui, aquests



processos seran complexos degut al control exercit per les diferents forces que actuen sobre l'arena, i els umbrals necessaris per a que aquesta sigui transportada (Livingstone et al., 1999; Pattanapol et al., 2011).

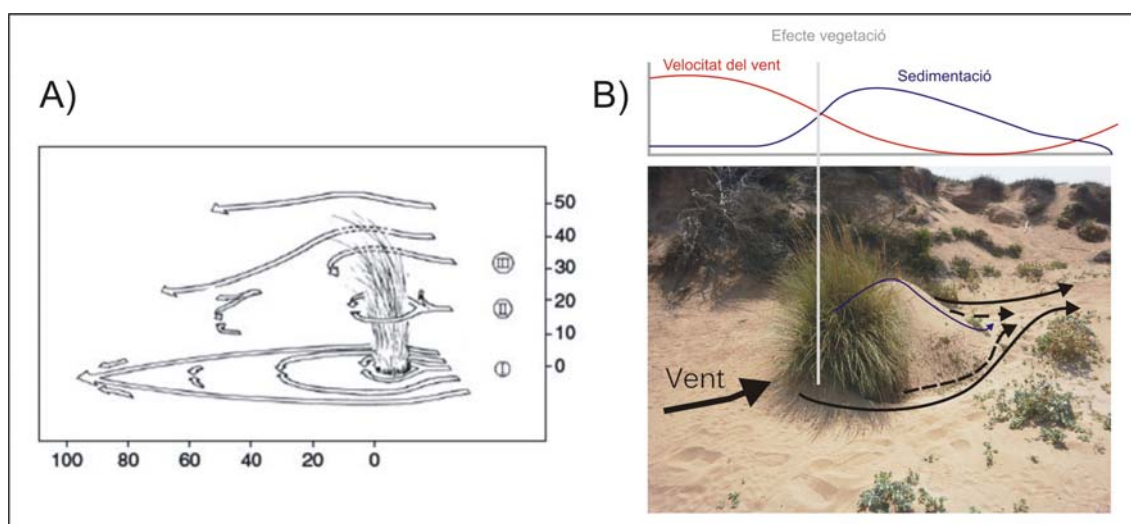
La variació en la dinàmica eòlica exercida sobre els sistemes dunars produirà canvis espacio-temporals en tant al transport de sediment, i als processos d'erosió i sedimentació. Aquests canvis doncs duran intrínseques variacions geomorfològiques dels sistemes – per exemple a partir de la formació de noves dunes, o bé la generació de zones erosives –, les quals poden tornar a remetre amb canvis substancials en la dinàmica eòlica predominant sobre el sistema en qüestió. Amb aquest escenari, tal i com reflecteix la Figura 29, la incidència d'un determinat comportament eòlic (1) sobre un estat geomorfològic inicial (A) podrà derivar en canvis que, amb el temps, modifiquin la fisonomia del sistema cap a una altra realitat geomorfològica (B), la qual, degut als canvis topogràfics produïts, podrà conduir a una variació en la dinàmica eòlica incident sobre el mateix (2).



**Figura 29:** Representació esquemàtica de les interaccions entre el flux eòlic i la morfologia dels sistemes dunars.

A l'hora de considerar els patrons de transport i sedimentació en camps de dunes n'és important la consideració de la variable rugositat del terreny, i d'aquells elements que la puguin incrementar (e.g. vegetació, afloraments rocosos en superfície, etc.). És

així doncs que el flux eòlic, un cop entre dins la superfície dunar és susceptible de ser modificat i alterat de varies maneres. El vent es modificarà de forma distinta depenent de si els objectes que l'intercepten són sòlids – sense porositat – o porosos, i per tant, en derivarà amb comportaments sedimentaris divergents (Walker i Hesp, 2013). Pel cas que ens ocupa, i centrant-nos amb aquells elements que suposen certa porositat, sigui per exemple la presència de vegetació, el vent actuarà en funció del grau en el que aquesta es manifesti. Si bé les plantes poc poroses poden tendir a comportar-se de la mateixa manera que els elements sòlids (e.g. troncs, roques) (Dong et al., 2008), les plantes amb més porositat causaran una disminució ràpida en la velocitat del flux eòlic (Bouma et al., 2007) i una conseqüent deposició sedimentària formant dunes embrionàries tals com *nebkhas* o *shadow dunes* (Figura 30). Les dimensions de les morfologies derivades – longitud i altura – estaran estrictament controlades per l'altura de la planta, la seva porositat inicial, i la velocitat del vent incident (Hesp, 1981).



**Figura 30:** A) Model conceptual segons Walker i Hesp (2013), modificat de Hesp (1981) sobre el comportament del flux eòlic front la interferència de la vegetació (escala en cm); B) Exemple sobre l'efecte de la vegetació vers a la velocitat del vent i als processos de sedimentació derivats (Cala Tirant, Menorca).

El model descrit anteriorment es dóna principalment en situacions caracteritzades per la presència individual d'espècies (Sutton and McKenna Neuman, 2008; King, et al., 2008). És així que com més elements – entenent-ho per individus de plantes – hi hagi, aquests incrementaran la rugositat suposant una major complexitat en tant al comportament del flux eòlic derivat (Lee i Soliman, 1977; Nickling i Davidson-Arnott, 1990), resultant alhora amb la coalescència de diferents *shadow dunes* i *nebkhas*. Una variació en les espècies existents, en l'altura de les plantes, i en la seva densitat i

distribució també podrà generar canvis vers a la velocitat de flux i a les turbulències generades (Hesp, 1983; Burri et al., 2011).

Si fins al moment ens hem centrat amb el vent com a l'agent principal del transport sedimentari, del seu funcionament i comportament, i de la vegetació com un dels agents a tenir en compte vers a la seva intercepció, altres elements a considerar han estat posats de manifest per varis autors. Rotnicka (2013) ressalta la importància que els fluxes verticals – expressats per la variable altura – tenen vers a la comprensió de la dinàmica eòlica sobre ambients sedimentaris litorals. D'altra banda, Delgado-Fernandez (2011) conclou de la importància que la humitat de l'arena pot tenir vers al transport sedimentari, tenint competència per a modificar els llims de moviment. Finalment, estudis recents sobre la dinàmica eòlica dins *blowouts* atorguen important rellevància al control exercit per la topografia sobre el comportament del flux eòlic (Hesp i Walker, 2012; Smyth et al., 2012).

#### 1.8.2. La dinàmica eòlica dins morfologies *blowout*

Si bé la dinàmica eòlica ha estat objecte d'estudi recurrent pel que fa a sistemes sedimentaris litorals al llarg de les darreres dècades, la seva relació directe des d'una dimensió espai-temps vers al transport sedimentari manca encara per ser estudiada, i en especial pel que respecta a les morfologies que ocupen la present tesi. El primer estudi centrat amb l'anàlisi de la dinàmica i comportament del vent dins *blowouts* apareix de la mà de Landsberg and Riley (1943). Aquest, i els subseqüents treballs d'Olson (1958; 1958a) demostren per primera vegada l'acceleració del flux eòlic a conseqüència de les condicions topogràfiques dintre del *blowout*, així com també la separació – expansió – del flux a la cara de sobrevent – *lee* –. Hails i Bennet (1981) testificaren els diferents comportament eòlics en funció de si aquests incidien perpendicularment sobre el *blowout* – en angle recte – o bé si ho feien amb una certa obliquïtat. En el primer cas els autors justifiquen la formació de moviments circulars un cop el flux arriba a l'interior del *blowout*, mentre que en el segon dels casos observen una intensificació del flux, amb màximes velocitats al llarg de la cubeta de deflació.

El moviment sedimentari produït dins morfologies *blowout* també ha estat objecte d'estudi per a varis autors. Harris (1974) en un experiment dut a terme a South Wales va arribar a mesurar modificacions de la superfície compreses entre els 1-107 cm/any. D'altra banda, Jungerius et al. (1981) trobà que, en el cas de *blowouts* localitzats a De

Blink (Holanda), els processos d'erosió i sedimentació es donen de manera complexa com a resultat de la variació de la velocitat i direcció del vent dins del *blowout*, i d'altres variables atmosfèriques. No obstant, conclou que en la majoria dels *blowouts* estudiats la cubeta de deflació tendeix a aprofundir-se a conseqüència dels processos erosius. Resultats similars van ser testats per Jungerius i van der Meulen (1989), els quals afegixen que els *blowouts* normalment creixien en longitud en direcció contrària als vents dominants. Lancaster (1986) en el seu experiment dut a terme a Elands Bay (Sud Àfrica) manifestava que els màxims ratios d'erosió i sedimentació es donaven en els "fronts de la duna" (e.g. entrada del *blowout* – *throat* – i al lòbul de deposició), i que aquests disminuïen en la part central de la morfologia.

Pluis (1992) afegí en el seu estudi la variable *temps*. Així analitzà la relació entre els processos erosius dins un *saucer blowout* (Meijndel, Holanda) i la velocitat del vent en superfície, arribant a la conclusió de que els menors ratios d'erosió es produïen a l'hivern – amb majors nivells d'humitats al sòl –, endemés de testar, tal i com altres autors ja havien manifestat anteriorment, que la velocitat i direcció del vent eren els factors més importants a considerar vers als canvis topogràfics en superfície. També centrant-se en un *saucer blowout* Gares i Nordstrom (1987; 1995) trobaren que les mínimes velocitats es donaven a la base de la morfologia, mentre que els màxims valors es produïen a la cresta de la *foredune* i a un dels marges superiors del *blowout*. Com a conseqüència el màxim transport es donava en una petita ruptura localitzada a la cresta de la *foredune*. Hesp (1996) i Hesp i Hyde (1996) examinaren la dinàmica eòlica i el transport sedimentari, en aquest cas dins un *trough blowout*, destacant en els seus resultats l'acceleració soferta pel flux eòlic un cop aquest s'endinsava dins la pròpia morfologia com a conseqüència del control topogràfic exercit.

A l'igual que feu Pluis (1992), la variable *temps* també va ser contemplada per Byrne (1997) el qual examinà el transport sedimentari produït en un *trough blowout* (Ontario) en una escala temporal, conclouent que a l'hivern es donaven els màxims episodis erosius, contrarestats per períodes d'acreció sedimentària al llarg de la primavera i l'estiu. Fraser et al. (1998) van centrar el seu estudi en analitzar els patrons de comportament del flux eòlic atenent a diverses direccions, conclouent que la formació de fluxos helicoidals dintre del *blowout* es desenvolupament de manera diferent en funció si la incidència del vent era paral·lela a la direcció del *blowout*, o si aquesta era de manera obliqua. Més recentment, Hugenholtz i Wolfe (2009) centren el seu estudi en estudiar les variacions espacials vers a la velocitat i direcció dels vents dintre d'un

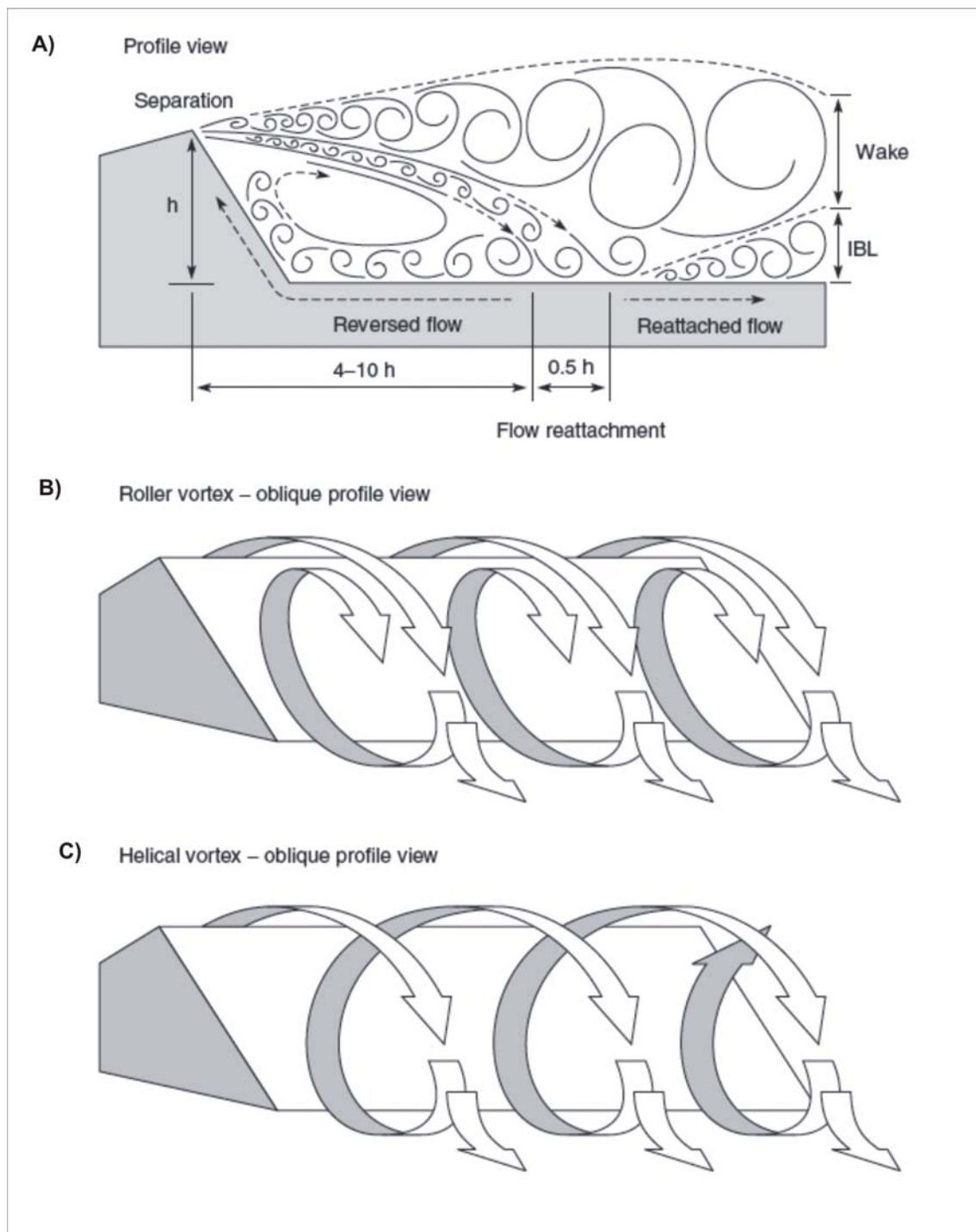
*saucer blowout* en el sentit d'incrementar les interaccions entre el binomi dinàmica eòlica-topografia.

Les darreres investigacions centrades amb la dinàmica eòlica en morfologies *blowouts* han permès incrementar el coneixement existent vers als fluxos interns i secundaris, no tan sols a la cara de sotavent – *stoss* –, sinó també a la part exposada a sobrevent – *lee* –. Així, autors com Hesp i Walker (2012) i Smyth et al. (2011; 2012) aporten interessants resultats sobre la complexitat dels fluxos eòlics, ambdós casos dintre de morfologies *bowl blowouts*, destacant-ne el control que la topografia exerceix sobre el seu comportament.

Si bé la dinàmica eòlica dins *blowouts* ha estat notablement estudiada, segons Hesp (2002), des de 1943 (Landsberg and Riley, 1943), i que amb el temps altres autors s'han centrat en la caracterització del transport sedimentari derivat (Cabrera i Alonso, 2010), sembla ser que, fins al moment, no existeixen dades empíriques que relacionin, directament, dades de vent amb dades de sedimentació a conseqüència del transport dintre de *blowouts* – entenem com directament que la relació sigui simultània en espai i temps de mostreig –. En aquest sentit doncs, part de la present tesi es basarà en establir aquesta primera aproximació relacionant dades empíriques de vent i transport mostrejades de manera homogènia en temps i espai (veure resultats al capítol 4).

### 1.8.3. La importància dels fluxos eòlics secundaris

Com ja era apuntat al principi d'aquest apartat, el comportament eòlic existent a sotavent – *stoss* – de les morfologies dunars ha estat extensament estudiat. No obstant, la recerca centrada en una millor comprensió del flux incident sobre la cara de sobrevent – *lee* – i de la seva relació amb els patrons sedimentaris ha estat, fins al moment, notablement manco analitzada. Estudis més recents basats amb experimentació en túnels de vent, modelització de fluids – *Computational Fluid Dynamics*, CFD –, i experiments de camp a partir d'anemòmetres ultrasònics 3D (Dong et al., 2009; Baddock et al., 2007, 2011; Smyth et al., 2011; 2012) han obert la llum vers a una millor comprensió del comportament del flux eòlic al *lee* de la duna i, en menor mesura, de les seves implicacions geomorfològiques. Els resultats obtinguts pels estudis esmentats, entre d'altres, semblen indicar que la dificultat en tant al comportament del flux eòlic un cop aquest entre dins la cara sobrevent de les morfologies dunars es complica encara més.



**Figura 31:** A) Model conceptual en tant a la separació del flux eòlic i als seus patrons de reversió un cop aquest arriba al *lee* de la duna segons Walker i Hesp (2013) modificat de Walker i Nickling (2002).

La pressió estàtica exercida per la topografia de la duna en la seva cara de sotavent – *stoss* – sembla a ser que genera un reajustament de la dinàmica eòlica incident al *lee*, alterant-ho vers a la seva direcció i velocitat. Tal i com es mostra a la Figura 31A un cop el flux arriba a la cresta de la morfologia dunar comença a sofrir un

procés de separació. La zona més propera i limítrofa amb el *lee* de la duna es caracteritza per la generació i formació d'un flux invertit – *reversed flow*, que reverteix cap a la direcció contrària del flux predominant – que no obstant, quan topa de nou amb la topografia de la duna – *lee* – torna a canviar la seva direcció de manera el·líptica. A mesura que s'allunya de la duna, i a conseqüència de la pèrdua del control exercit per la topografia existent, es torna a donar una zona de reagrupació – *reattached flow* – del flux de la capa límit inferior – *internal boundary layer*, IBL – i aquell que flueix a més altura. La visualització del flux i la seva turbulència en els experiments en túnel de vent i camp dutes a terme per Walker i Nickling (2002; 2003) mostren com aquesta zona de reajustament del flux no es produeix en cap punt concret ni fix, però sí a uns 0.5 m (d'altura) de la superfície.

Si bé s'apunta a que de cada cop més es coneixen les condicions, conseqüències i factors que condicionen el flux eòlic al *lee* de les morfologies dunars, tal i com es suggeria anteriorment, sembla ser que manca incrementar el coneixement de com aquests processos afecten al transport sedimentari i, alhora, a les conseqüències geomorfològiques derivades. No obstant, tal i com apunten Walker i Hesp (2013), la zona de màxima alteració i dificultat vers a tal incògnita sembla donar-se a la *reversed zone*. Així, i com es reflecteix a la Figura 31B i C la reversió del flux just al *lee* de la duna pot divergir en funció de la incidència del flux predominant incident, bé donant-se de manera el·líptica – *roller vortex* – (B) o helicoidal – *helical vortex* – (C). Aquesta diferència condicionarà també els patrons de remobilització i transport sedimentari.

Pel que es refereix als efectes que els fluxos secundaris poden tenir a sobre de morfologies *blowouts* alguns autors com Hesp i Walker (2012) conclouen que, tot i de que no hi ha dubte que la morfologia del *blowout* respondrà en major mesura a la direcció i força del flux eòlic predominant, alguns dels processos geomorfològics quedaran controlats per l'existència dels fluxos secundaris. Així, segons manifesten aquests autors, la presència de fluxos secundaris en poden derivar patrons de transport sedimentari multidireccional dintre del propi *blowout*, i per tant, alterar-ne els processos d'erosió i sedimentació – sobretot des d'una perspectiva espacial –. Smyth et al. (2012) a partir de la seva simulació CFD també testen la importància de la presència de fluxos secundaris dins les morfologies *blowouts*, ressaltant el control de la topografia com un dels factors responsables de la seva formació, així com la direcció del flux predominant vers a l'orientació del *blowout*.

# Capítol 2

---

**L'èxit no s'aconsegueix només amb qualitats especials. És sobretot una tasca de constància, de mètode i d'organització**  
*(J.P. Sergent)*

Justificació de les zones d'estudi i  
metodologia





**CAPÍTOL 2 JUSTIFICACIÓ DE LES ZONES D'ESTUDI I METODOLOGIA****2.1. Justificació de les zones d'estudi**

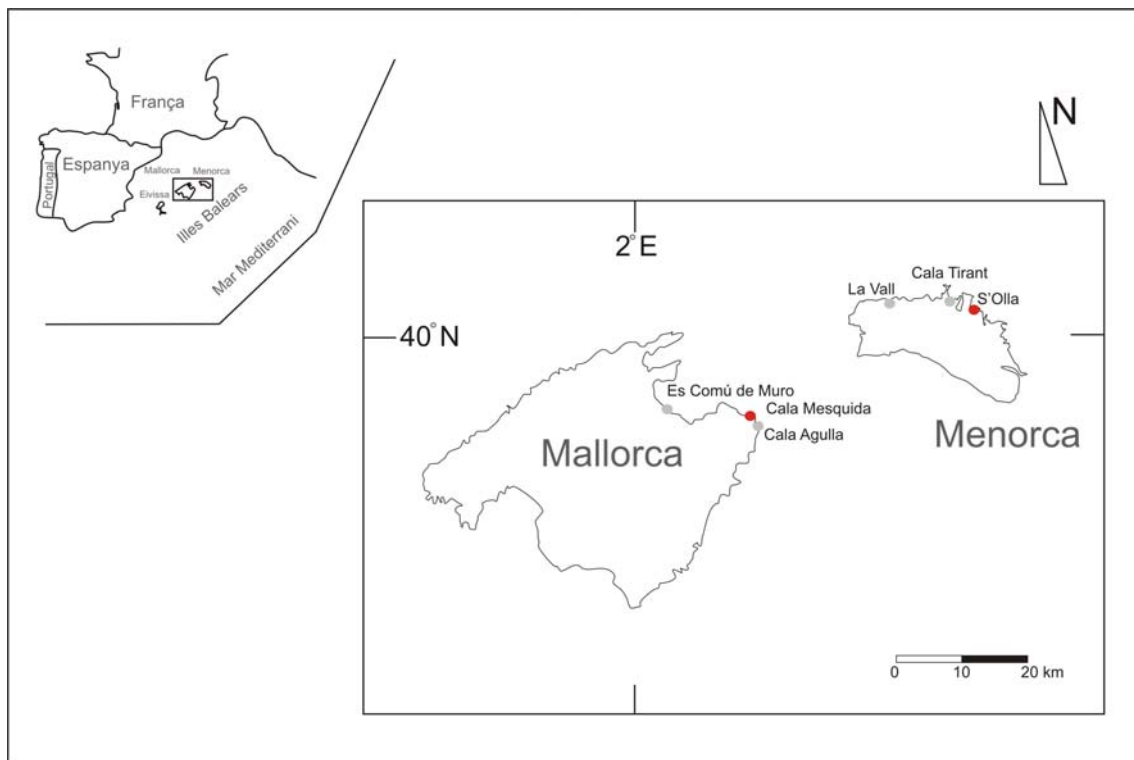
Un cop establert el marc teòric que ens permet pensar en una caracterització més precisa de les morfologies *blowout*, ens trobem en condicions d'establir una justificació raonada en tant a la selecció de les zones d'estudi que ocuparan la present tesi amb l'objectiu de desenvolupar la seva línia de recerca. Tal i com ja era apuntat a l'epígraf 1.6.2., molts en seran els factors que derivaran i condicionaran, primer l'origen, i després l'evolució de les morfologies *blowout* en sistemes eòlics i sedimentaris litorals; bé de caràcter físic o natural (Hesp, 2013), o també a conseqüència de la pressió antròpica exercida sobre aquests sistemes (Mir-Gual et al., 2013).

Endemés, i com també s'apuntava a l'epígraf abans mencionat, les condicions i característiques físiques i geogràfiques de cada emplaçament hauran de ser necessàriament considerades alhora de caracteritzar, entre altres, les morfologies *blowouts* existents en cada un dels sistemes. Així, l'ancestre del treball que es presenta passa per a l'observació i valoració de tots els sistemes dunars actius avui dia a les illes de Mallorca i Menorca (Illes Balears), bé en observacions *in situ* al camp, bé en fotointerpretació en laboratori. Aquest suposa el primer escaló metodològic a partir del qual després es donarà sentit al treball en tota la seva extensió. Tal i com s'apuntava, l'observació amb perspectiva de les morfologies *blowout* existents en els distints sistemes de les dues illes en qüestió suggeria, ja des del principi, que les condicions locals de cada emplaçament jugaven – o podien jugar – un paper important en tant a la caracterització d'aquestes en cada cas.

A grans trets, s'observen sistemes dunars que es desenvolupen en trams de costa oberta i rectilínia, limítrofes a grans platges d'arena, i en alguns casos localitzats sobre zones estructuralment deprimides o sota processos de subsidència (e.g. es Comú de Muro a Mallorca, o Son Bou a Menorca). Aquestes, tot i les limitacions geogràfiques que puguin interferir en el seu desenvolupament com a sistema (e.g. presència de zones humides en la seva part més interior) es desenvolupen extensament, ja que la pressió topogràfica i estructural no és excessiva. Així, solen conformar extensos sistemes platja-duna, amb una gradació prou configurada i marcada. De les anàlisis visuals inicialment fets s'observa que la presència de *blowouts* en aquest casos es dona, principalment, al llarg de la primera línia de duna – tot i que també es puguin desenvolupar a l'interior del

sistema; e.g. Cala Tirant, Menorca – . La valoració feta *in situ* i a partir de l'anàlisi fotomètrica mostrava com, principalment, es tractava de *blowouts* petits, condicionats en molts casos per la presència de vegetació – herbàcia i arbustiva –, tot i que recurrents al llarg del front de duna.

D'altra banda, en alguns sistemes localitzats en un marc estructural més encaixat, normalment associats a cales, la situació es contempla distinta. En aquests casos doncs, es percep que el sistema dunar pròpiament dit, en tota la seva extensió, es desenvolupa a partir de la força exercida per la topografia limítrofa, i per tant, sota un control estructural destacable. En aquests casos, més que presència de petits *blowouts* en la primera línia de duna, s'observen grans lòbuls de deflació, seguits d'extenses zones de deposició sedimentària, que actuen com a grans *blowouts* i que, alhora, caracteritzen la integritat del sistema.



**Figura 32:** Localització geogràfica dels sistemes platja-duna seleccionats per la present tesi. En el cas de Mallorca, localitzats en la seva totalitat al quadrant nord-est de l'illa, mentre que en el cas de Menorca aquests es localitzen a la costa nord, exposada a Tramuntana. Els punts en gris localitzen els sistemes que s'engloben dins el primer grup, amb *blowouts* de dimensions reduïdes, tot i que recurrents al llarg de la primera línia de duna. D'altra banda, els punts en vermell situen els sistemes que, controlats en bona part per la pressió topogràfica limítrofa, es desenvolupen terra endins a partir d'importants canals de deflació.

Aquesta diferenciació inicial esdevé doncs com el pilar que sustenta l'elecció dels sistemes dunars elegits per al desenvolupament de la present tesi, a l'hora d'establir-ne

una caracterització de les seves morfologies *blowout*, i de la seva dinàmica eòlica i sedimentària, tot per entendre les implicacions geomorfològiques derivades sobre el conjunt dels sistemes dunars litorals. Així, es seleccionen un total de sis sistemes platja-duna (Figura 32), localitzats al llarg de la costa de les illes de Mallorca i Menorca, i que, segons la postulació feta anteriorment es divideixen en dos grups:

- (A) Extensos sistemes, poc condicionats per la pressió topogràfica: es Comú de Muro, Cala Agulla (Mallorca), Cala Tirant i La Vall (Menorca).
- (B) Sistemes encaixats, amb pressió topogràfica: Cala Mesquida (Mallorca) i s'Olla (Menorca).

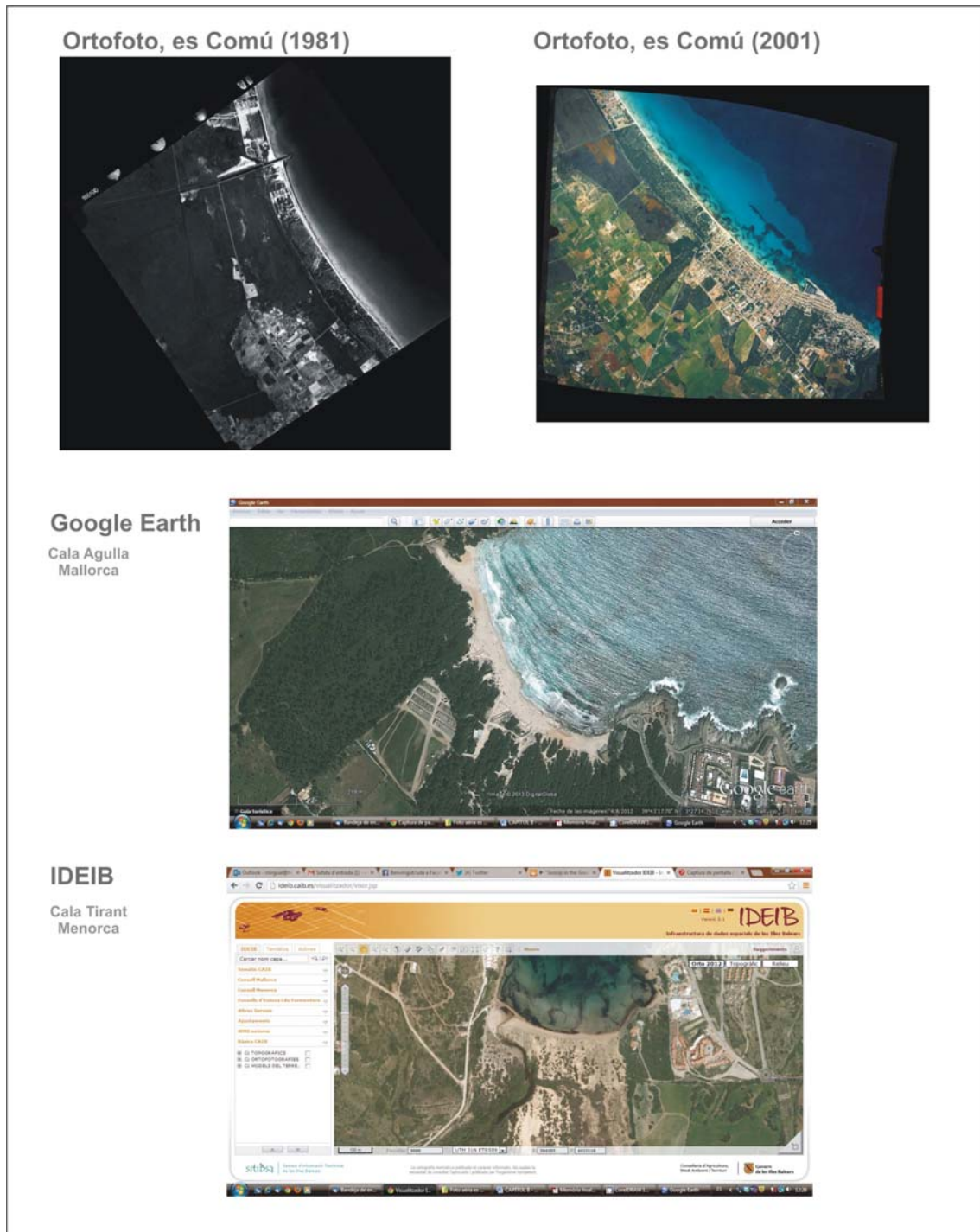
En el cas de Mallorca, l'elecció dels dos sistemes es limita a que ambdós responen amb bastanta precisió a cada una de les dues categories esmentades, mentre que en el cas de Menorca, a part també de respondre a dites característiques, es contemplà la incidència i importància dels vents de Tramuntana enfront a la geomorfologia de la costa.

Les característiques de cada un dels sistemes, així com també els distints exercicis experimentals que donen cos al present treball, faran que els mètodes utilitzats siguin en algunes ocasions compartits i en altres divergents en funció dels objectius i de les necessitats requerides per a cada una de les situacions. Així doncs, d'ara endavant aquest capítol es centrarà en descriure i desenvolupar els mètodes utilitzats per a l'obtenció dels resultats els quals sustenten la tasca de recerca desenvolupada en aquesta obra.

## **2.2. Caracterització de les morfologies *blowout***

### 2.2.1. Selecció i localització de *blowouts*

Aquesta va ser la primera tasca desenvolupada i a partir de la qual tot el treball que es descriurà posteriorment s'ha pogut dur a terme. Un cop l'elecció dels sis sistemes com a zones d'estudi, la primera tasca va ser la localització de les morfologies *blowout* a ser estudiades. El procés i els criteris de selecció i localització van ser diferents en funció de les característiques de cada una de les zones d'estudi.



**Figura 33:** Exemples gràfics dels mitjans visuals utilitzats en gabinet per a la identificació de les morfologies *blowout* existents en primera línia de dunes dels sistemes estudiats. Tot i que l'anàlisi de les morfologies identificades en els sistemes del grup A està basada en la situació actual, també s'utilitzen fotogrames de situacions passades, com demostren les dues imatges situades a la part superior de la figura, amb fotogrames referents a es Comú de Muro. La imatge intermitja mostra la vista oferida per Google Earth™ sobre el sistema dunar de Cala Agulla, mentre que la inferior reflecteix el front dunar de Cala Tirant, amb imatge del visor de l'IDEIB (<http://ideib.caib.es/visualitzador/visor.jsp>).

Si és cert però, i cap remarcar-ho, que només es contempen els *blowouts* existents en la primera línia de duna, i que, en els casos possibles, s'ha descartat l'anàlisi i valoració de *blowouts* generats a les parts més consolidades dels camps de dunes. La justificació del dit passa pel fet d'entendre que les implicacions derivades en ambdues situacions no són les mateixes i, n'és el cas dels *blowouts* en primera línia el que més satisfà estudiar d'acord amb els objectius de la tesi que es presenta.

Pel que fa al primer grup de sistemes estudiats (es Comú de Muro i Cala Agulla a Mallorca, i La Vall i Cala Tirant a Menorca) el procés d'identificació i localització ha esdevingut més complex, primer per la gran recurrència de morfologies *blowout* en el seu front, i en segona instància, pel criteri a seguir – principalment el referit a la dimensió mínima per a ser considerats – a l'hora d'incloure'ls. Aquest segon punt, referit a les dimensions mínimes de les morfologies per a ser estudiades o no, es complica en casos com es Comú de Muro, Mallorca, ja que algunes de les morfologies existents mostren estats de desenvolupament molt incipients. Pensant sobre el primer dubte aparegut, el criteri finalment aprovat passa per la importància de considerar l'estat inicial d'una morfologia *blowout* al temps de ser correctament gestionada – atenent a les característiques de cada indret –. Partint d'aquesta premissa doncs, finalment, també són incloses en el present treball aquelles morfologies que, tot i les seves dimensions reduïdes, es contempen com a *blowouts* potencialment desenvolupables en el temps.

El primer pas per a la localització de cada una de les morfologies posteriorment analitzades passa per l'anàlisi fotomètrica duta a terme per; a) l'anàlisi estereoscòpica a partir de fotografies aèries i, b) a partir de mitjans digitals convencionals tals com Google Earth<sup>TM</sup> o el visor IDEIB (Infraestructura de Dades Espacials de les Illes Balears) <http://ideib.caib.es/visualitzador/visor.jsp>. Aquesta primera aproximació visual permet establir una perspectiva genèrica de la recurrència i distribució de les morfologies existents en els fronts dunars dels diferents sistemes estudiats (Figura 33). La localització i selecció definitiva dels *blowouts* finalment estudiats es dugué a terme *in situ*, al camp. Cada una de les morfologies fou georeferenciada a través del sistema de posicionament global, GPS Garmin Dakota 20 d'alta sensibilitat. Aquesta doncs esdevé la primera passa per a la conseqüent caracterització de cada una de les morfologies, explicada i descrita en el següent epígraf.

El marc metodològic anteriorment descrit només es deu als sistemes que conformen el primer grup (A). No obstant el procés no s'ajusta pel cas que ocupa l'anàlisi dels sistemes que donen cos al segon (B). Aquests, per les seves

característiques, no conformen la complexitat i la divergència de morfologies simples, sinó que en la seva integritat, tal i com esmentàvem anteriorment, es desenvolupen com a grans canals de deflació. Per aquest motiu doncs, la seva anàlisi i els mètodes seguits per a tal seran distints, basant-se principalment en un marc descriptiu i una anàlisi espacio-temporal (veure més a l'apartat 2.3.).

### 2.2.2. Descripció i caracterització de *blowouts*

La caracterització i descripció de les morfologies erosives *blowout* en els diferents sistemes estudiats es va fer a través de diverses campanyes de camp:



- Es Comú de Muro: 09/04/10 – 03/06/10
- Cala Agulla: 06/04/11 – 27/05/11
- Tirant: 23/08/11
- La Vall: 24/08/11

Per tal de donar una caracterització descriptiva a cada un dels *blowouts* existents s'utilitzà una fitxa de camp (Figura 34) composta de diverses variables, incidint principalment amb les seves característiques geomorfològiques i ecològiques, endemés d'algunes pinzellades sobre el seu estat de conservació, i les mesures de gestió aplicades fins al moment. A més, cada una de les fitxes s'acompanya d'informació gràfica amb dues fotografies de detall.

Començant per la informació referent al dia de mostreig, localització de cada morfologia (georeferenciació), i la seva pertinent enumeració (a la Figura 34 exemple del *blowout* 19 d'es Comú de Muro, Mallorca), un primer grup de variables es centra principalment en l'estat de conservació presentat en cada cas, diferenciant entre; a) l'existència o absència de cordó de protecció entre la platja alta i la primera línia de duna, b) l'existència o absència de trampes d'interferència eòlica bé a la boca del *blowout*, bé en el seu interior i, c) una valoració gradual de l'estat de fragmentació del front dunar, distingint entre alt, mitjà o moderat. Un segon grup de variables incideix més amb els trets geomorfològics, o aquells que hi puguin tenir alguna relació. Dintre d'aquest vessant es caracteritza; a) l'existència o presència d'aflorament d'arrels – entenent-ho com un signe clau i tàcit de fragmentació i erosió –, b) la presència

d'elements, tals com restes de *Posidonia oceanica* dintre del *blowout* – entenent-ho com un signe de transport i interferència eòlica –, c) existència de *ripples marks*, i d) existència de *foredunes* a la part exterior del *blowout* – entre la platja emergida i la primera duna –. Finalment, un tercer grup de variables és aquell que es centra amb la caracterització ecològica de la forma erosiva analitzada. La primera consideració que es té en compte es la presència o absència de vegetació herbàcia en primera línia, mentre que a posteriori es du a terme un inventari florístic de les espècies existents en cada cas i en el moment de mostreig, diferenciant entre espècies herbàcies i espècies de característiques llenyoses-arbustives. Finalment, la fitxa contempla un apartat d'observacions per a qualsevol incidència o peculiaritat mostrada en cada cas.



Blowout: 19		Data: 26/4/2010	
			
Localització GPS: N 39° 46. 997' E 003° 08. 048'		Àrea	
Cordó de protecció: SI (a la part central ha estat enterrat per arena)		Trampes eòliques: SI (una de canyet que està rompuda, i una de restes de Posidonia)	
Fragmentació del front dunar	Alt	Arrels penjant: SI	
	Mode		
	Baix		
Bolles posidònia i canyet: SI		Ripples: NO	
Aparent colonització de vegetació psammòfila: SI			
Foredunes: SI			
Vegetació psammòfila: SI <ul style="list-style-type: none"> <li>- <i>Ammophila arenaria</i></li> <li>- <i>Pancratium maritimum</i></li> <li>- <i>Eryngium maritimum</i></li> <li>- <i>Lotus cytisoides</i></li> <li>- <i>Cutandia maritima</i></li> <li>- <i>Aetheorhiza bulbosa</i> subsp. <i>bulbosa</i></li> <li>- <i>Matthiola incana</i></li> <li>- <i>Crucianella maritima</i></li> </ul>			
Vegetació llenyosa: SI <ul style="list-style-type: none"> <li>- <i>Juniperus oxycedrus</i> L. Subsp. <i>Macrocarpa</i> (ginebró)</li> <li>- <i>Pinus halepensis</i> (pi blanc)</li> <li>- <i>Pistacea lentiscus</i></li> </ul>			
Observacions: <ul style="list-style-type: none"> <li>- Aquest B-O està molt fragmentat. Conseqüència del seu estat hi podem trobar en el seu interior nombrosos camins, cada un dels quals es dirigeix a la part interior del sistema dunar. La seva part central es troba molt fragmentada, amb un "illot" d'arena el qual mostra importants signes de degradació i fragmentació. La trampa de Posidonia s'ha vist sedimentada d'arena, i ja es pot percebre la seva colonització de vegetació psammòfila, tant amb grans individus com amb petits, creant inclús algun <i>foredune</i>.</li> </ul>			

**Figura 34:** Fitxa de camp utilitzada per a la caracterització de les morfologies *blowout* en cada un dels sistemes estudiats. En el cas superior es mostra l'exemple del *blowout* 19 del sistema d'es Comú de Muro (Mallorca).

### 2.2.2.1. Cartografia de les morfologies *blowout*

La cartografia de les morfologies *blowout* existents als fronts dunars dels sistemes pertanyents al grup A – es Comú de Muro i Cala Agulla (Mallorca), i Cala Tirant i La Vall (Menorca) – s’ha dut a terme a partir de programes convencionals de sistemes d’informació geogràfica (GIS); ArcView<sup>TM</sup> 3.2., i d’altra banda a través de programes de dibuix tals com CorelDraw<sup>TM</sup> 12.

En aquest sentit, la representació gràfica de la localització de cada una de les morfologies analitzades i la seva posterior enumeració i codificació s’ha dut a terme a partir de CorelDraw<sup>TM</sup> 12. Les coordenades obtingudes al camp a partir de la utilització de GPS s’han bolcat al sistema de coordenades facilitat pel software Google Earth<sup>TM</sup> permetent la geolocalització cartogràfica precisa de cada un dels *blowouts* inicialment identificats. Pel que fa a la seva representació, el cas que major dificultat ha comportat ha estat el sistema d’es Comú de Muro (Mallorca), degudes les seves dimensions i longitud de front. En aquest sentit ha estat precís segmentar el sistema en 7 parts diferents (veure Figura 69 a l’epígraf 3.1.1.2.). En els altres casos, la representació s’ha pogut dur a terme d’un sol cop amb la seva totalitat.

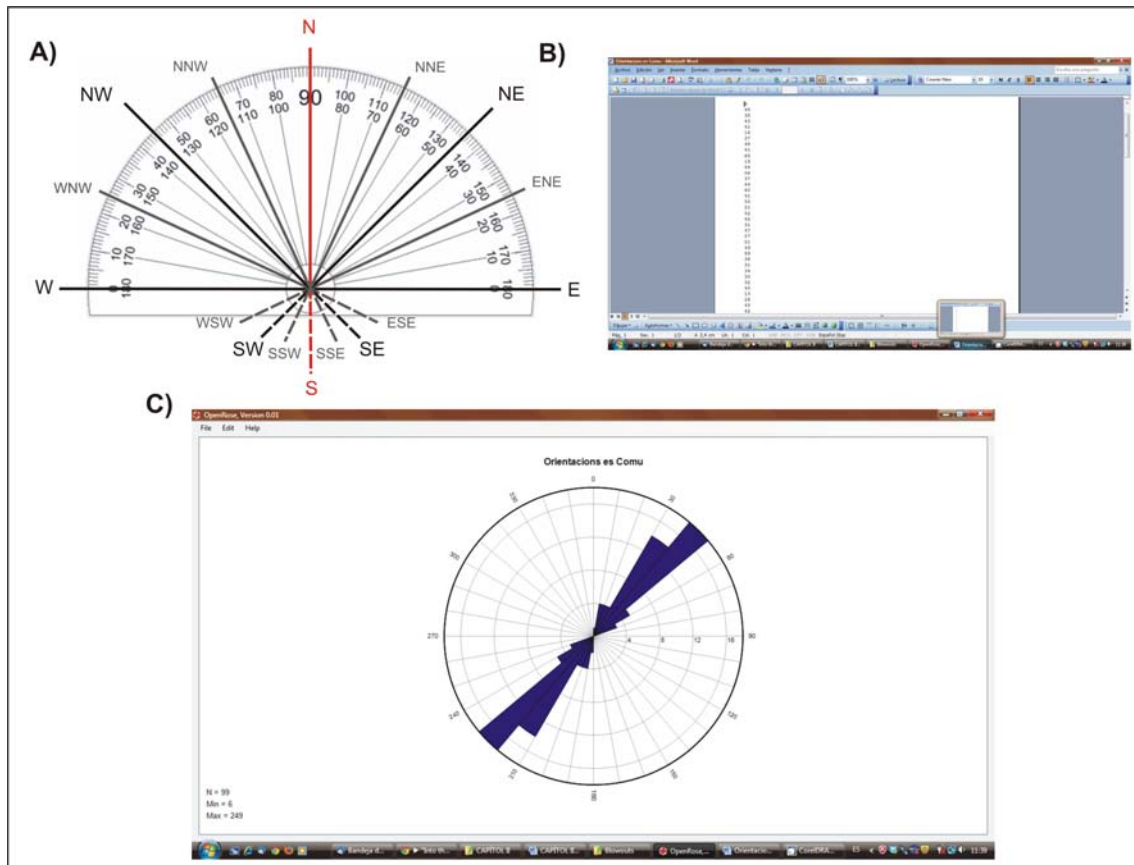
Per a la representació gràfica de l’àrea de cada *blowout* s’ha utilitzat el software ArcView<sup>TM</sup> 3.2., utilitzant com a base cartogràfica la fotografia aèria digitalitzada i georeferenciada – ortofoto de 2010 – obtinguda de la base de dades espacials IDEIB (<http://ideib.caib.es/visualitzador/visor.jsp>). La cartografia derivada d’aquest pas s’utilitzarà també per a verificar l’orientació de cada morfologia (veure a l’epígraf 2.2.2.2.).

### 2.2.2.2. Orientació de les morfologies *blowout*

La determinació de l’orientació presentada per cada *blowout* es postula com una variable important a tenir en compte a l’hora de considerar altres variables tals com la seva dinàmica eòlica i sedimentària, o els seus patrons d’evolució. En aquest sentit dos en són els passos seguits per a dur a terme la determinació de dita variable en cada cas d’estudi. En primer lloc es pren una primera mostra de l’orientació del *blowout* al camp, *in situ*, a partir de la brúixola calibrada del GPS Dakota 20, d’alta resolució. Així doncs,

en primera instància es té una aproximació acurada dels patrons orientatius seguits per cada morfologia.

No obstant, l'obtenció de l'orientació *in situ* pot derivar amb alguns problemes d'imprecisió. Un cop processades les dades en laboratori es determinaren alguns errors importants, fet que dugué a corroborar el primer test amb el traç de les orientacions a sobre de la cartografia anteriorment elaborada sobre cada sistema, i en concret, sobre cada *blowout*. Aquest mètode permet una major perspectiva de la morfologia – major escala – i per tant, una major objectivitat a l'hora de traçar la orientació seguida. En els casos de *blowouts* simples es segueix l'orientació marcada per la plataforma d'erosió, mentre que en els casos dels *blowouts* ramificats, es segueix el seu axis principal.



**Figura 35:** Cronologia dels passos seguits per al càlcul de les orientacions de cada una de les morfologies *blowout*; a) obtenció de l'orientació (en graus), b) creació de la base numèrica de cada una de les orientacions i, c) interfície del programa OpenRose 0.01<sup>TM</sup> amb el resultat gràfic.

La cartografia elaborada amb anterioritat serveix com a base per a traçar les orientacions en cada un dels *blowouts* identificats, i de tal manera també, per reconvertir la informació a una variable quantitativa a partir de l'extrapolació de graus (°) derivada (Figura 35A). De tota aquesta informació es genera una base de dades numèriques

(Figura 35B) que posteriorment és exportada al software OpenRose 0.01<sup>TM</sup> per a la creació d'una rosa d'orientacions gràfica per a cada cas d'estudi (Figura 35C).

### 2.2.2.3. Definició i caracterització de zones degradades (ZD)

Aquest és un punt íntegrament descriptiu i centrat únicament en el cas d'es Comú de Muro, i Cala Agulla (Mallorca). En el procés d'identificació i localització de *blowouts*, *in situ* i a través de fotografia aèria, es va determinar l'existència d'algunes zones que, degut el seu alt grau de fragmentació no podien ser considerades com a formes *blowout* simples, sinó que requerien en elles una major complexitat d'anàlisi.

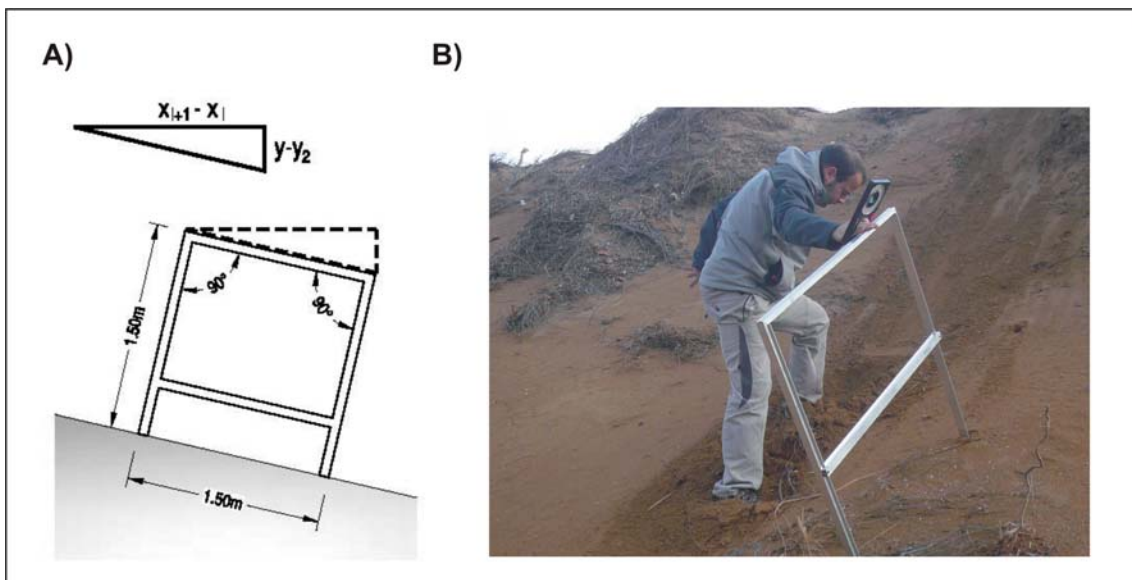


**Figura 36:** La fotografia aèria digitalitzada ha estat l'eina per a visualitzar l'estat actual de les zones degradades (ZD), i per veure'n la seva evolució a partir de la comparació d'imatges anteriors. En el present cas la comparació d'una de les zones degradades a es Comú de Muro entre la imatge de 1956 (superior) i la de 2012 (inferior).

En aquest sentit, des del punt de vista metodològic es van deixar fora del procés seguit pel que respecte a les formes simples, anteriorment descrit, i es van considerar a part. Així, la present tesi es limita a esmentar-les i a descriure-les, endemés de cartografiar-les i localitzar-les. No obstant, per a veure l'evolució i determinar el model evolutiu de les morfologies *blowout* simples s'utilitza la comparació retrospectiva d'imatges aèries per tal de identificar les diferències entre els diferents moments en una escala temporal i veure així, quins han estat els patrons seguits des de 1956 fins a l'actualitat (Figura 36).

### 2.2.3. Aixecament de perfils topogràfics interns dins *blowouts*

La caracterització topogràfica i morfològica interna de cada una de les morfologies *blowout* analitzades s'ha dut a terme a partir de l'aixecament de perfils topogràfics. Seguint el mètode ja aplicat per alguns autors tals com Emery (1961), Delgado-Fernández i Loid (2004), Puleo et al. (2008), Mir-Gual (2009), i Mir-Gual et al. (2013), els perfils interns es realitzen a partir de la utilització d'un pantòmetre 1.5 x 1.5 m (Figura 37) amb l'objectiu d'adquirir la informació necessària per a l'aixecament de perfils topogràfics bidimensionals sobre els eixos de longitud (x) i altura (y).



**Figura 37:** A l'esquerra la representació esquemàtica del pantòmetre utilitzat per a l'aixecament de perfils topogràfics a l'interior de les formes erosives (Mir-Gual, 2009), i a la dreta (b) una imatge presa al camp mentre s'aixecava un dels perfils. Foto de Cala Tirant (Menorca). A la imatge dreta també s'aprecia el clinòmetre de precisió utilitzat per a mesurar el desnivell de cada perfil.

En alguns casos, sobretot aquells referits a *blowouts* amb dimensions més reduïdes, i per tal d'obtenir una major precisió amb l'aixecament dels perfils i amb la topografia derivada, s'utilitza també un pantòmetre de 0.5 x 0.5 m (Mir-Gual et al., 2013). Per al càlcul dels graus de pendent s'utilitza un clinòmetre d'altra precisió Tajima SLANT 100 (Figura 37B).

Per al càlcul i aixecament dels perfils pròpiament dits, la informació de camp és processada sota el principi de Pitàgores i en la mesura que Puleo et al. (2008) postulen. Així, la hipotenusa es fixa en 1.5 o 0.5 m (depenent de la mida del pantòmetre utilitzat), mentre que l'eix vertical del triangle es la mesura presa manco el nivell de la superfície plana ( $y - y_L$ ), i l'eix horitzontal ve representat per la distància entre la mesura actual ( $X_{i+1}$ ) i l'anteriorment presa ( $X_i$ ) (Figura 37A). D'aquesta manera, la distància horitzontal mesurada entre  $X_i$  i  $X_{i+1}$  es reproduirà en funció de la diferència entre  $y - y_L$ .

$$X_{i+1} - X_i = \sqrt{1 - (y - y_L)^2}$$

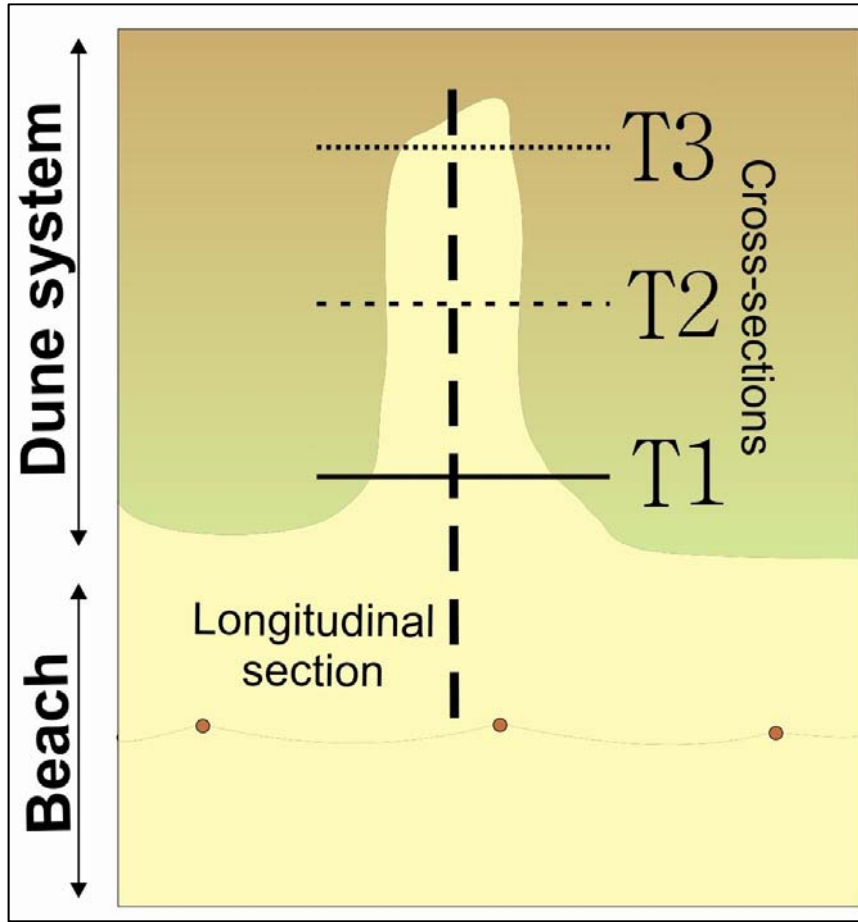
Per a cada un dels punts de mostreig es realitza un perfil longitudinal, des de la boca – *throat* – fins a la part més interior, si és el cas, fins al lòbul de deposició sedimentària. No obstant, el número de perfils transversals variarà en funció de les dimensions de la morfologia en qüestió, principalment de la seva longitud (Taula 2).

Sistema	Nº total BO	2 perfils	3 perfils	4 perfils	5 perfils
Es Comú	58	6	45	6	1
Cala Agulla	14	1	13	-	-
Cala Tirant	6	-	6	-	-
La Vall	7	1	6	-	-

**Taula 2:** Relació entre els número total de *blowouts* per a cada un dels sistemes analitzats, i el número de perfils topogràfics interns aixecats en cada cas.

Com bé queda reflectit a la Taula 2 la tendència general seguida ha estat basada amb l'aixecament de tres perfils transversals per a cada cas d'estudi. En aquest sentit es du a terme l'aixecament d'un perfil a la boca – *throat* – del *blowout* (T1), un segon perfil a la seva part central, coincidint amb la plataforma de deflació (T2), i un tercer localitzat a la seva part interior, si és el cas, en el seu lòbul de deposició (T3) (Figura

38). En els casos en que el número de perfils sigui major a tres, aquests es localitzaran principalment seguint criteris geomorfològics, així com també considerant la longitud de la morfologia analitzada.



**Figura 38:** Representació esquemàtica en planta de la localització de cada un dels perfils topogràfics aixecats dins de les morfologies *blowout* (Mir-Gual et al., 2013).

#### 2.2.3.1. Càlcul de pendent i desnivell

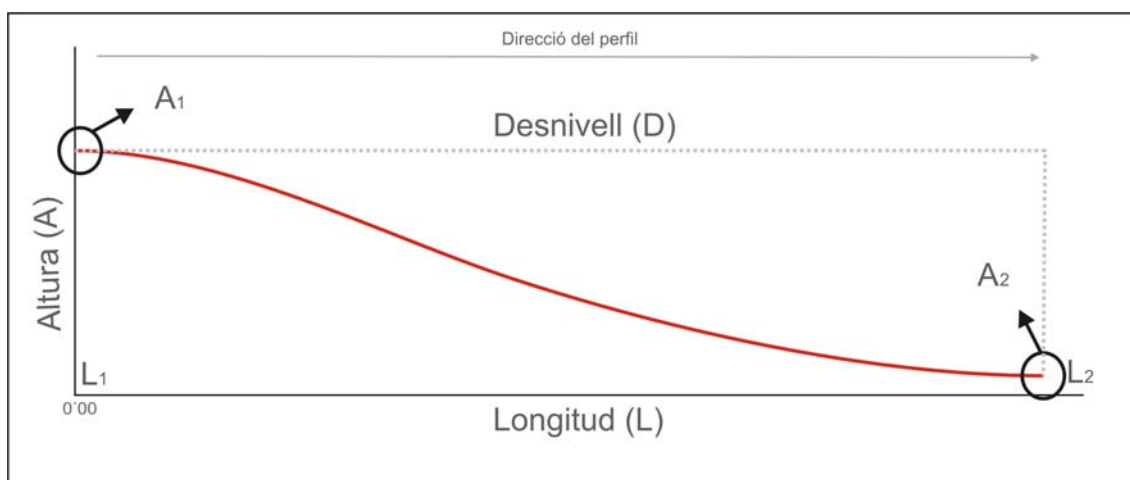
El càlcul del pendent, desnivell i longitud de cada un dels *blowouts* mesurats es du a terme a partir de la informació obtinguda amb els perfils longitudinals aixecats (epígraf 2.2.3.) La direcció del perfil sempre va des de la part interior del *blowout* fins a la seva boca (Figura 39). Així, partint des d'un punt 0.00, la longitud ( $L$ ) es donarà amb la distància acumulada des de la primera mesura ( $L_1$ ) fins a la darrera ( $L_2$ ). El desnivell acumulat al llarg de la secció no suposarà més que la diferència de cota entre l'inici del transsecte i el seu final. Així el desnivell queda determinat per;

$$D = A_1 - A_2$$

a on  $D$  és el desnivell,  $A_1$  és la cota en la primera mesura ( $L_1$ ), i  $A_2$  és la cota que hi ha en la darrera mesura ( $L_2$ ).

Per al càlcul de la pendent mitjana en cada una de les morfologies s'aplica;

$$P = \frac{D \cdot 100}{L}$$



**Figura 39:** Representació gràfica (sense escala) de les variables utilitzades per al càlcul de la longitud, el desnivell i el pendent de les morfologies *blowout*.

#### 2.2.4. Tractament estadístic

##### *2.2.4.1. Anàlisi clústers o dendrogrames*

El tractament estadístic s'ha centrat principalment en l'associació de les morfologies estudiades a partir de la seva similitud. Així, la informació base a partir de la qual s'ha desenvolupat la posterior anàlisi s'ha obtingut de la caracterització de cada *blowout* al camp, a partir de la fitxa reflectida per la Figura 34. A grans trets, les variables utilitzades per a desenvolupar l'anàlisi estadística s'agrupen en; a) de caire ecològic, b) geomorfològic i, c) d'ús i gestió.

Per a cada un dels sistemes analitzats en el present treball s'han dut a terme tres anàlisis *cluster* – dendrogrames – amb l'objectiu de, a partir de les variables mostrejades, agrupar els punts de mostreig en tant a la seva similitud objectiva. Les anàlisis s'han diferenciat



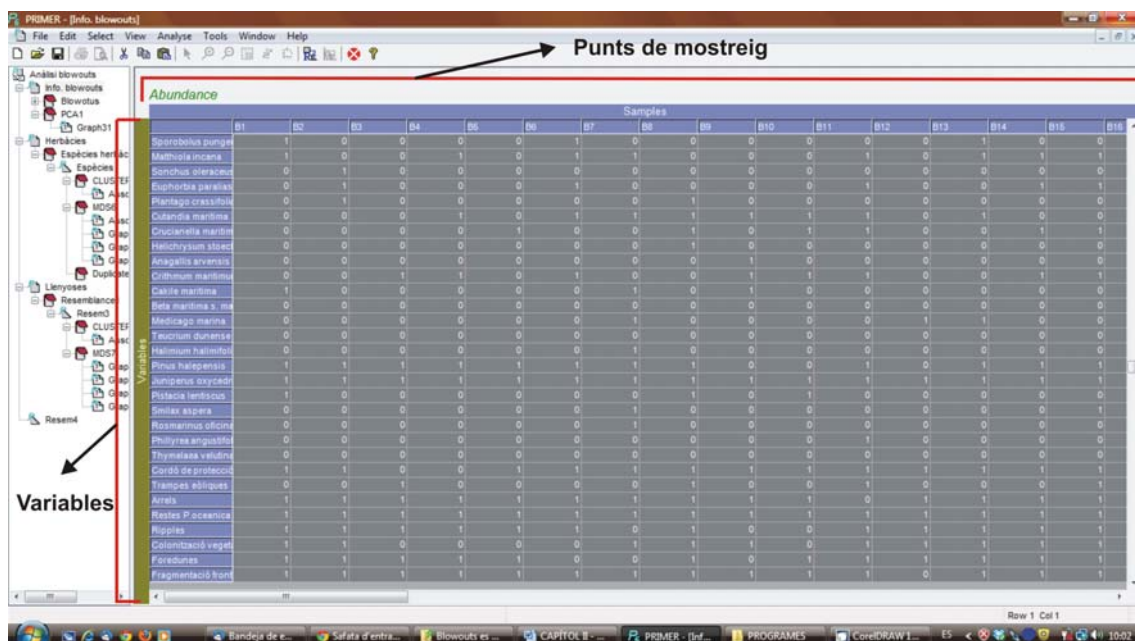
entre agrupacions a partir de les variables estudiades – e.g. vegetació herbàcia i llenyosa –, i en agrupacions a partir de les mostres – punts de mostreig –.

L'anàlisi estadística es du a terme a través del paquet estadístic Primer6<sup>©</sup>. Cada un dels dendogrames es realitza a partir dels patrons de presència (codi=1) i absència (codi=0) de cada una de les variables analitzades, i es fan a través de l'índex *Bray Curtis similarity*, el qual proporciona els patrons percentuals de similitud entre les diferents variables i punts de mostreig.

Per a cada un dels sistemes es fan tres *clusters* diferents:

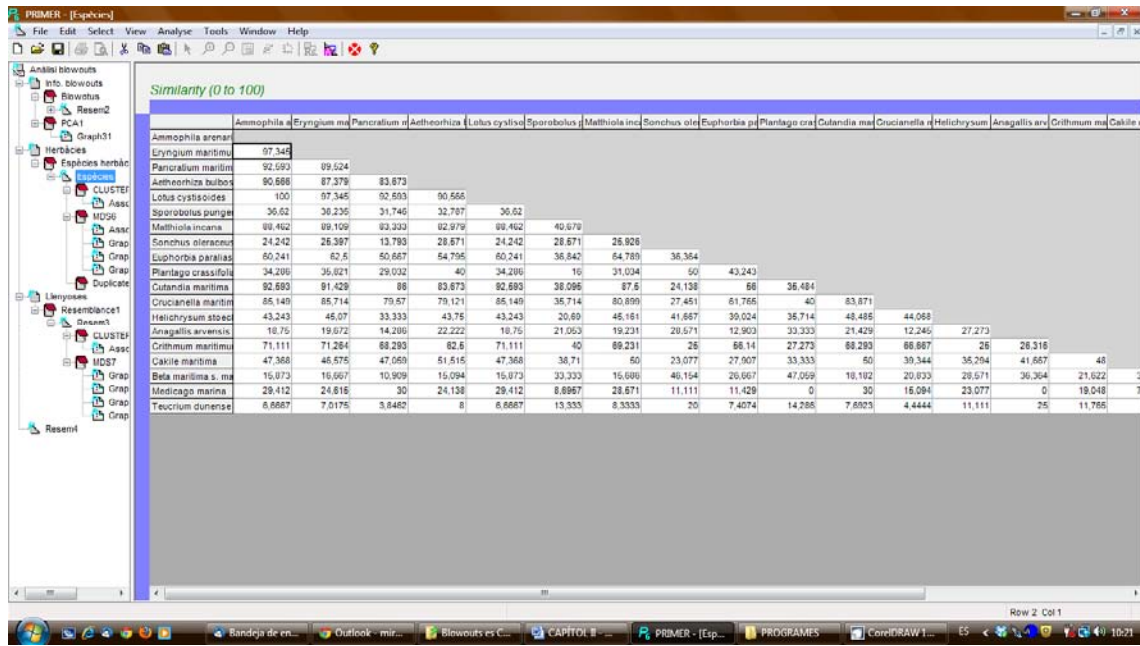
- Associacions de les espècies herbàcies
- Associacions de les espècies llenyoses i/o arbustives
- Associació de *blowouts* (a partir de totes les variables)

El primer pas es centra en, a sobre d'una taula de doble entrada, definida per un eix amb les variables i l'altre amb els punts de mostreig – cada un dels *blowouts* –, reflectir quantitativament la presència (1) o absència (0) de cada variable per a cada un dels *blowouts* analitzats (Figura 40). D'aquesta manera es fa una primera aproximació quantitativa del pes que cada una de les variables té sobre el conjunt de la mostra, i així també, de la caracterització de les morfologies mostrejades.



**Figura 40:** Interfície de la matriu de doble entrada entre les variables analitzades i els punts de mostreig emplenada per la presència (1) o absència (0) de cada una d'elles. Imatge del Primer6<sup>©</sup>.

El proper punt passa per la ponderació percentual de la relació existent entre les distintes variables. Així, a partir de la taula numèrica inicial, es du a terme una anàlisi de ressemlança – *resemblance analysis* – (Figura 41) el qual, a partir de la presència/absència de cada una de les variables, les agrupa entre elles a partir del seu grau de similitud, derivant-ne l'anàlisi *cluster* final. Aquesta agrupació s'executa a partir del grau de similitud entre 0-100.



**Figura 41:** Interfície de la matriu de ressemlança entre les variables analitzades. Imatge del Primer6<sup>®</sup>.

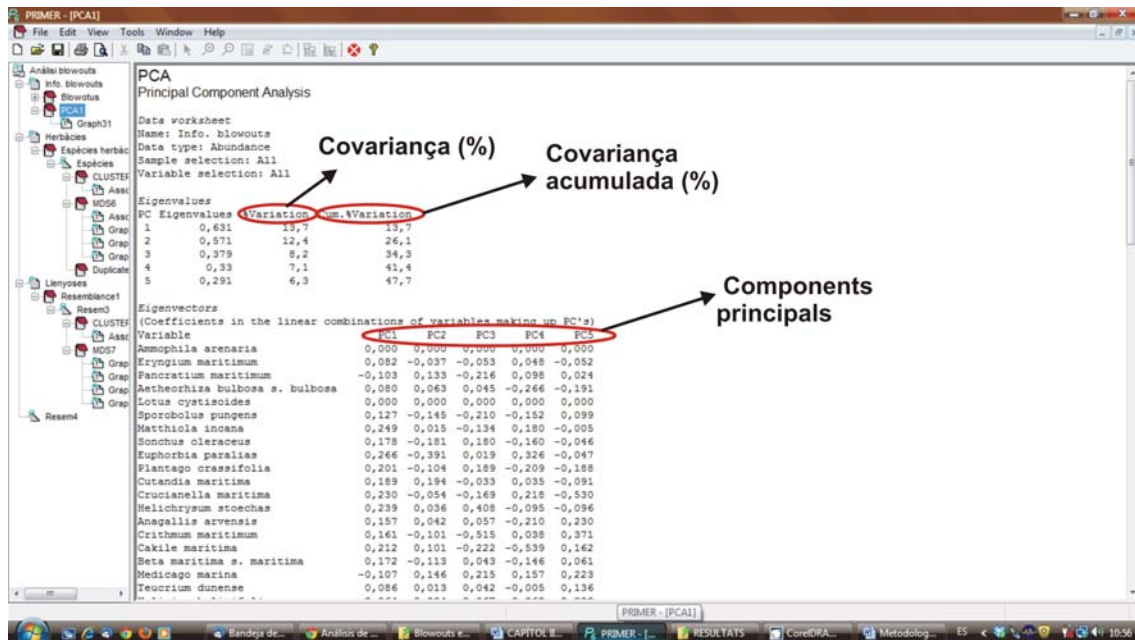
En el cas de l'anàlisi referida a les associacions entre els diferents punts de mostreig – *blowouts* –, aquest es centrarà en donar valor de relació a cada un dels *blowouts*, i no, en aquest cas, a les variables. Així, el resultat derivarà de l'agrupació de *blowouts* – punts de mostreig – a partir de les variables que comparteixin entre sí.

#### 2.2.4.2. Anàlisi de Components Principals (ACP)

Per a tal de disminuir la dimensió del conjunt de dades utilitzades pel processament estadístic, sobretot vers a les variables que suposen major pes en la caracterització objectiva de les morfologies *blowout* en cada sistema estudiat, es du a terme l'aplicació d'una anàlisi de components principals (ACP) englobant el conjunt de *blowouts* en cada un dels sistemes. Aquesta tècnica ens permetrà representar

gràficament en dues o tres dimensions diverses variables de les dades en factors, o components, compostos per l'agrupació de diverses variables. Intuïtivament, la tècnica serveix per determinar la causa de variabilitat en un conjunt de dades i ordenar-les a partir de la seva importància. L'ACP és útil per identificar les variables responsables de causar una falla o les variables més afectades per aquesta falla.

D'igual manera que en el cas anterior, partint de la taula numèrica de doble entrada formada per la presència/absència de cada una de les variables en els diferents punts mostrejats (Figura 40), s'aplica l'anàlisi ACP el qual agrupa les variables més rellevants en dues components principals, explicades per la matriu de la covariància. El pes de la covariància acumulada determinarà les components que expliquen la major part de la mostra (Figura 42).



**Figura 42:** Interfàcia de la matriu derivada en el càlcul per a l'anàlisi de components principals. Imatge del Primer6<sup>©</sup>.

### 2.2.5. Classificació de *blowouts* a partir de la seva forma i estructura

Tal i com ja s'apuntava al capítol 1 (veure epígraf 1.6.3.) existeixen ja varies classificacions de morfologies *blowout*, principalment a partir de la forma que aquestes presenten. Tot i la diversitat, sembla ser que la classificació establerta per Cooper (1958), tot i la seva senzillesa, ha estat la que més acceptació i divulgació ha tingut

dintre del camp científic centrat en l'estudi d'aquestes morfologies. Així, altres autors com Hesp (1996; 2002) li donen suport (Figura 20 de l'epígraf 1.6.3.).

Partint d'aquesta premissa, el procés de classificació morfològica de les formes erosives analitzades en el present treball es centra en dos escenaris precedits un en l'altre. En primera instància es realitza una caracterització descriptiva, basada amb l'observació visual de cada *blowout* en planta, a partir de la seva anàlisi fotomètrica, o *in situ*. Partint dels criteris morfològics seguits i estipulats per Copper (1958) primer, i per Hesp (1996; 2002) posteriorment, s'estableix una classificació morfològica dels *blowouts* analitzats. No obstant, es percep que, a part de la forma també hi ha divergències en l'estructura, motiu pel qual, a partir de la mateixa metodologia, es du a terme una diferenciació de les morfologies *blowout* a partir d'aquesta variable.

Amb aquest sentit, i ja com a part de la present tesi, Mir-Gual i Pons (2011) estableixen una primera aproximació de la classificació de *blowouts* d'es Comú de Muro a partir dels criteris establerts per Cooper (1958) i Hesp (1996; 2002), mentre que Mir-Gual et al. (2013) introdueixen la representació gràfica modelitzada en 3D.

No obstant, amb l'objectiu de verificar i testar quantitativament la classificació anteriorment descrita, basada tan sols amb observacions visuals i qualitatives, es procedeix a l'aplicació d'un índex 0-1 basat amb la informació quantitativa obtinguda de la realització dels perfils topogràfics interns (T1, T2, T3) i del perfil longitudinal (veure epígraf 2.2.3.). Així s'aplica l'índex;

$$iT_x = \frac{T_x}{L}$$

a on  $iT_x$  fa referència a la relació entre la longitud del *blowout* i cada un dels perfils transversals,  $T_x$  és la longitud de cada perfil transversal i  $L$  es refereix a la longitud del *blowout*. Per a millorar la interpretació gràfica de l'índex esmentat anteriorment els resultats són gràficament representats a partir de la utilització dels valors mitjans dels perfils transversals per a cada tipologia de *blowout*. Cada valor és transformat a cm (e.g.  $0.41 = 4.1$  cm), assumint alhora que  $L = 10$ , estandarditzant així ambdós valors per a poderós representar uniformement.

A continuació, per tal de posar en ordre quantitatiu un valor referent a la relació entre l'àrea del *blowouts* i cada una de les tipologies a partir dels perfils topogràfics realitzats s'aplica el següent índex:

$$iA = \frac{\Sigma iT_x}{L3}$$

a on  $iA$  és l'àrea del *blowout* per a cada tipologia i  $\Sigma iT_x$  és la suma de la mitja dels perfils transversals dels *blowouts* d'una mateixa tipologia.

#### 2.2.6. Aplicació d'índex de relació entre tipologies i variables associades

Un cop la caracterització descriptiva de les morfologies *blowout*, i de la seva classificació – qualitativa i quantitativa –, el darrer pas es centra en establir relacions empíriques entre les tipologies de *blowout* determinades en cada sistema i algunes de les seves variables associades. Així doncs, a part de la relació ja establerta entre cada una de les tipologies i els perfils topogràfics aixecats en el seu interior (ja explicada a l'epígraf 2.2.5.), aquestes es relacionen amb la seva orientació primer, i en segona instància, amb les espècies vegetals associades.

En el primer cas, un cop agrupats els *blowouts* existents en cada sistema, es mira la relació que hi ha entre cada tipologia i la seva orientació – expressada en graus –. D'aquesta manera es demostren els possibles patrons de relació – o no relació – entre les diferents tipologies i l'orientació mostrada, a més de les possibles diferències entre els distints tipus de *blowout*.

Pel que fa a la relació tipologia de *blowouts* – vegetació, el primer pas es centra en el recompte del número de vegades que una espècie es troba en *blowouts* que pertanyen a una mateixa tipologia (e.g. el nº de vegades que *Ammophila arenaria* es troba en *saucer blowouts*). No obstant, aquesta és una aproximació no del tot objectiva, ja que el pes percentual que pugui jugar una determinada tipologia a sobre de la mostra total no es correspongui al pes que hi juga una tipologia diferent (e.g. el pes percentual dels *trough blowouts* sobre el total de les morfologies a es Comú de Muro és del 56.9%, mentre que el dels *mixed shapes* es redueix al 43.1 %). Per a tal de corregir aquesta imprecisió i establir així una relació més empírica entre la vegetació i les diferents tipologies, s'aplica l'índex 0-1;

$$R_{t-v} = \frac{\Sigma p}{\Sigma BOc}$$

a on  $R_{t-v}$  és la relació entre la tipologia de *blowout* i les espècies vegetals identificades,  $\Sigma_p$  fa referència al nº de vegades que una espècie és present en *blowouts* d'una mateixa tipologia, mentre que  $\Sigma BO_c$  es refereix al nº total de *blowouts* d'aquesta mateixa tipologia.

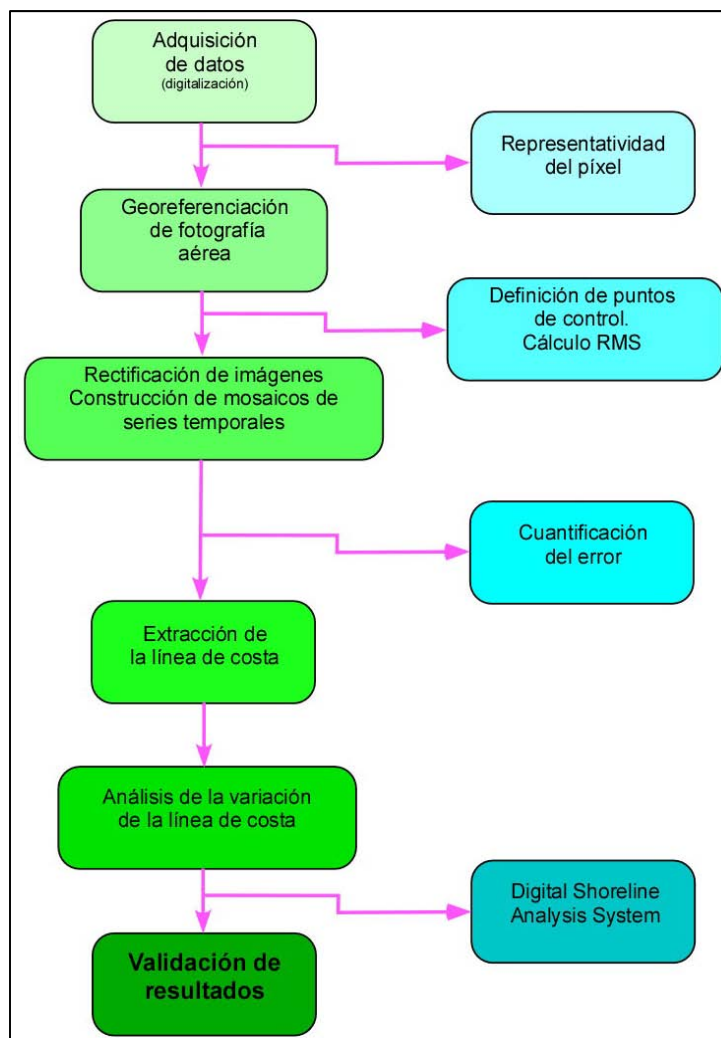
### 2.3. Evolució espacio-temporal de sistemes *blowout*

Els sistemes platja-duna, degudes les seves característiques intrínseques i físiques, esdevenen espais altament dinàmics i canviants a escala espacial, però també des d'una perspectiva temporal. En sistemes com els que ocupen aquesta tesi, aquests canvis es manifesten sobretot a la primera línia de duna, principalment arrel de; a) major incidència energètica – principalment del vent –, b) major disposició de sediment lliure – menor grau de fixació per part de la vegetació –, i c) major pressió antròpica. Amb aquest escenari, limitar-se a analitzar aquests ambients en períodes curts de temps pot emmascarar la percepció de l'evolució a llarg termini. Així doncs, és fa necessari l'observació de períodes llargs – superiors a 10 anys –, per tal de realitzar un diagnòstic fiable sobre el comportament evolutiu de la línia de costa, de la primera línia de duna, o bé també, de l'evolució dels lòbuls de deposició (Fraile i Ojeda, 2007).

Per tal de mesurar sistemàticament les variacions en els canvis de la primera línia de duna d'alguns dels sistemes estudiats (e.g. Cala Mesquida, Cala Agulla i s'Olla) al llarg d'un període temporal suficientment extens, s'ha seguit una metodologia desenvolupada a partir de la utilització conjunta de cartografia a escala 1:5.000 amb fotografies aèries verticals, ja que constitueixen el document més utilitzat per el càlcul de les taxes d'erosió/acreció litoral (Ojeda, 2000; Vizcaino, 2001). Per a tal fi s'han pres com a referència els fotogrames corresponents als anys 1973, 1979, 1988, 1990, 2002, 2006, 2009 i 2012 (Taula 3). Les fotografies referents a 1956, 1973, 1979, 1989 i 1990, deguda la seva antiguitat, han estat prèviament escanejades amb una resolució de 600 ppp. La seva digitalització s'ha dut a terme a través de la restitució fotogramètrica mitjançant SIG (Sistema d'Informació Geogràfica), la qual permet la correcció geomètrica de les imatges aèries que presenten errors degut a la distorsió panoràmica, obliquïtat, altitud i perspectiva, així com les deformacions inherents a la perspectiva cònica fotogràfica (Figura 43).

	1956		1973		1979		1989		1990		2002		2006		2008		2012	
	data	escal a	dat a	escal a	dat a	escal a	data	escal a	dat a	escal a	dat a	escal a	dat a	escal a	dat a	escal a	dat a	escal a
<b>S'Olla C.</b>	25-jul	5.000	/	/	08-jun	18.000	15-oct	5.000	/	/	15-sep	5.000	17-jun	5.000	26-abr	1:5.000	25-abr	2.500
<b>Agulla C.</b>	26-jul	5.000	15-mar	14.500	/	/	/	/	15-abr	5.000	20-sep	5.000	13-jun	5.000	20-jun	1:5.000	06-may	2.500
<b>Mesquida</b>	26-jul	5.000	15-mar	14.500	/	/	/	/	15-abr	5.000	20-sep	5.000	13-jun	5.000	20-jun	1:5.000	06-may	2.500

**Taula 3:** Informació referent als vols utilitzats per a l'anàlisi espacio-temporal del fronts dunars dels sistemes de Cala Agulla i Cala Mesquida (Mallorca), i s'Olla (Menorca).



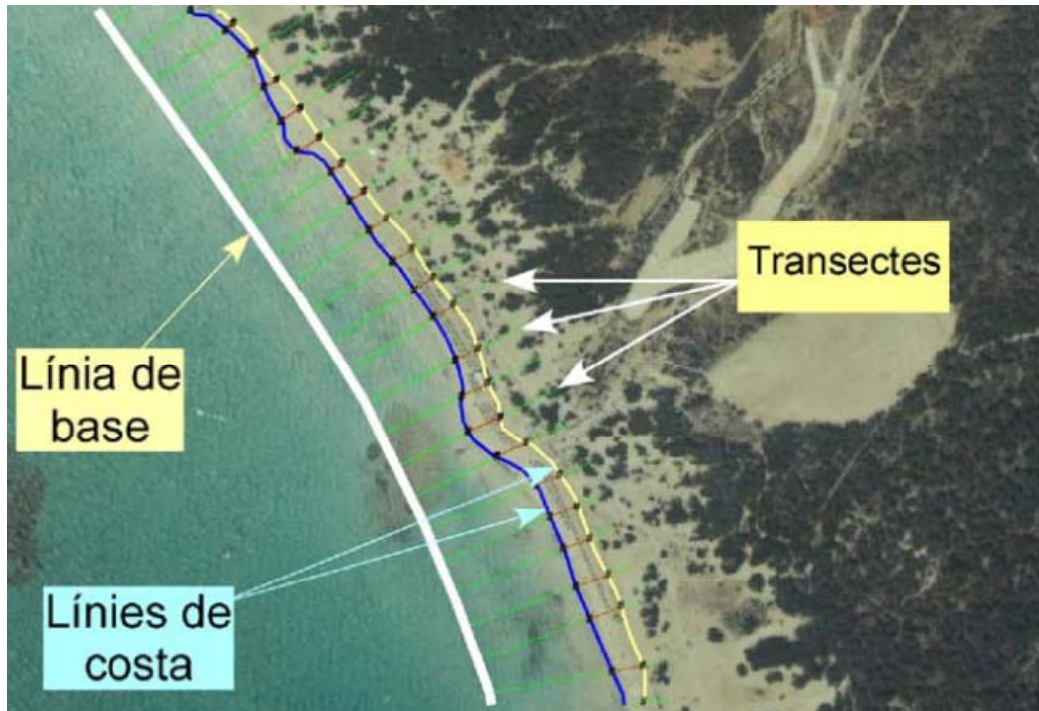
**Figura 43:** Etapes de la metodologia empleada per l'anàlisi de la variació espai-temps de la línia de costa, primer duna i *blowouts*.

Una vegada la digitalització de la base cartogràfica necessària per a dur endavant l'anàlisi, el procés de georeferenciació implica identificar una sèrie de punts de control amb coordenades X,Y conegudes (s'ha pres com a referència la ortofotografia de l'any 2012) que vinculin localitzacions de les dades ràster amb localitzacions de les dades referides espacialment. Els punts de control són utilitzats per a construir una funció de transformació polinomial que convertirà les dades ràster des de la seva localització actual cap a la localització espacial correcta. El nombre de punts de control – en aquest cas s'han pres un nombre de punts de control entre 8 i 22 – dependrà de la complexitat de la transformació polinomial que es vulgui utilitzar per a transformar les coordenades del ràster. Un cop tots els punts de control han estat seleccionats i combinats amb els corresponents en un mapa de projecció, les imatges han estat rectificades a través del software ArcGIS<sup>TM</sup>, el qual adapta les imatges a un sistema de coordenades homogeni. Els possibles errors derivats de la reconversió pot ser controlat mitjançant l'error residual (Taula 4). Aquest valor d'error, RMS – *Root Mean Square* – representa la diferència entre la ubicació dels punts coneguts i la seva ubicació després de la rectificació. El valor de RMS dóna una error mitjà estàndard en píxels (Taula 4). Com menor sigui aquest valor més precisa resultarà la rectificació (NOAA Coastal Services Center, 2004).

S'Olla		Cala Mesquida	
RMS	Cell Size	RMS	Cell Size
1956	0,5		0,5
1973		0,6	0,78
1979	0,52		
1983	0,86	0,13	0,67
1988	0,5		
1989			0,5
1997		0,96	2
2002	0,5		0,5
2006	0,5		0,5
2008	0,5		0,5
2010	0,25		0,25
2012	0,25		

**Taula 4:** Mida del píxel utilitzat en cada un dels fotogrames, i error derivat (RMS) de la georeferenciació (la foto aèria utilitzada com a base per a georeferenciar és la de 2012).





**Figura 44:** Exemple sobre la metodologia utilitzada per a determinar, en aquest cas, l'evolució de la línia de costa a partir del *Digital Shoreline Analysis System*.

La correcció geomètrica de la imatge ens permet poder traslladar les seves dades a una altra imatge a la qual es pot donar la projecció desitjada – en el nostre cas una projecció UTM –. Una vegada traslladades totes les fotografies al mateix sistema de coordenades (ETRS 1989 31N), la metodologia utilitzada, basada amb de l'eina *Digital Shoreline Analysis System* (Thieler et al., 2009), ens ha permès l'estudi comparatiu dels canvis en les diferents línies de costa i duna, permetent alhora establir-se les respectives comparacions des de la perspectiva temporal i espacial. Una vegada digitalitzades les línies de costa i de la primera duna per a cada un dels diferents vols, s'han seguit les següents passes;

1. A partir del SIG s'ha determinat la posició de la línia base en cada període per tal d'establir comparacions entre els diferents moments temporals. Aquesta eina realitza de forma automàtica el càlcul dels metres acumulats i/o erosionats entre cada moment i per cada transecte a partir d'una línia de referència paral·lela a la costa (Figura 44).
2. A partir d'aquesta línia de base s'estableixen uns transectes perpendiculars a la mateixa (Figura 44).
3. A partir dels resultats obtinguts, s'han fet els càlculs pertinents de;
  - a. mitjana d'erosió/acumulació

- b. relació erosió/acreció des del primer vol fins al darrer
- c. evolució superfície de platja/*foredunes*
- d. relació entre línia de costa i *foredune*
- e. evolució dels lòbuls de deposició
- f. les tendències observades.

## 2.4. Dinàmica eòlica i sedimentària

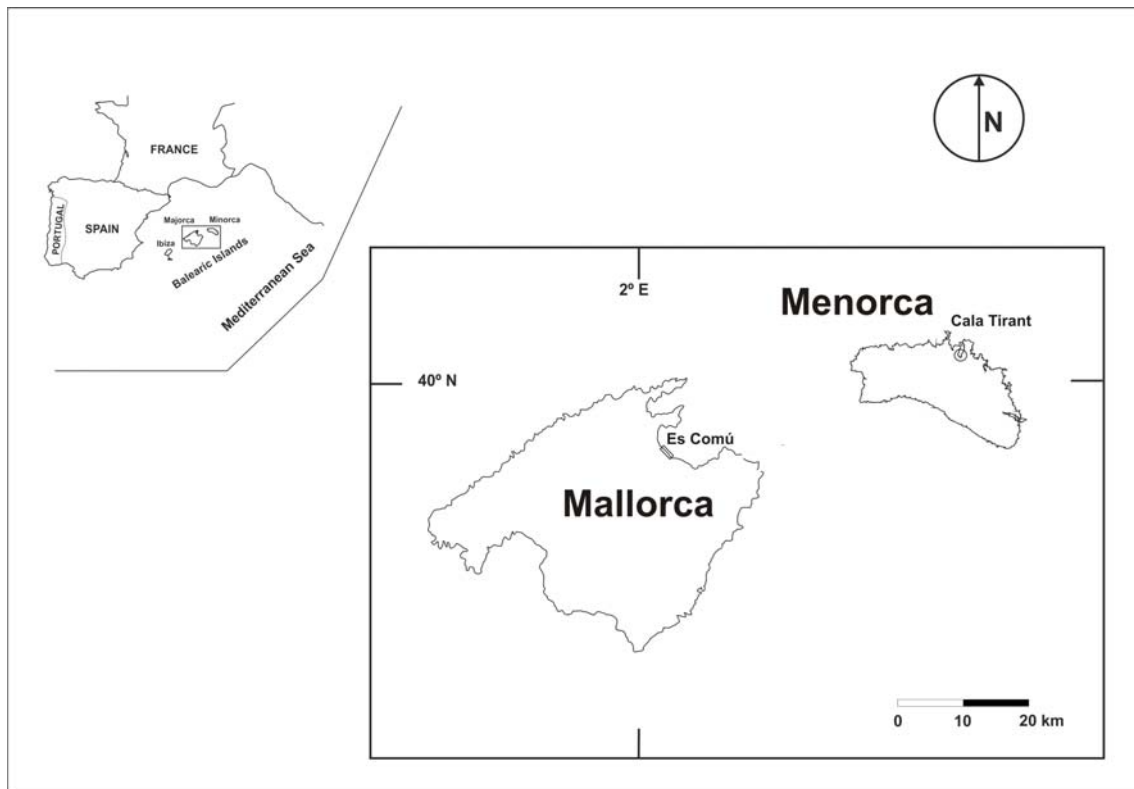
### 2.4.1. Plantejament experimental i selecció dels *blowouts*

Aquesta, sens dubte, esdevé la part més experimental i empírica de la present tesi. L'escassa quantitat de precedents a nivell internacional, i la total inexistència d'ells en el cas balear, ha fet que el plantejament inicial per a desenvolupar els experiments referits al comportament eòlic i sedimentari dintre de les plataformes *blowout* estudiades s'hagi fet més complex. Parlant en clau internacional, si bé en són varis els antecedents que s'han centrat en l'estudi de la dinàmica eòlica que s'esdevé en morfologies *blowout* (veure més en els epígrafs 1.3.4. i 1.8.2.), manco en són les referències que es centren en el comportament sedimentari derivat – des d'un punt de vista quantitatiu i empíric –. Aquesta proporció es disminueix a la màxima potència si parlem del cas de les Illes Balears, ja que els antecedents al respecte en són totalment inexistents. Endemés, cal dir també que si bé els dos factors han estat estudiats per separat, avui encara no existeixen dades empíriques que relacionin, dins *blowouts*, dades de vent amb dades de transport associades, mostrejades ambdues simultàniament, tant en temps com en espai.

Partint d'aquest escenari, el plantejament experimental inicial passa per a postular, de manera paral·lela, dos mètodes; un referit al mostreig de sediment, i l'altre a la quantificació del flux eòlic. Així, el plantejament experimental inicial es centra en coordinar les dues variables de mostreig de manera que puguin ser equiparades, comparades i analitzades simultàniament i així, complir amb l'objectiu de conèixer, en precís, la relació entre la dinàmica eòlica i el transport sedimentari, a més dels emplaçaments dominants per patrons d'erosió i/o sedimentació. En el present apartat, concretament en els epígrafs 2.4.4. i 2.4.5., es planteja de manera més detallada el

plantejament seguit i l'instrumental utilitzat, primer pel comportament del flux eòlic i després pel transport sedimentari, i alhora, per a correlacionar ambdues variables.

Si el plantejament experimental esdevé un punt a detenir-se, no manco 'compromesa' ha estat l'elecció de les morfologies *blowout* elegides per a desenvolupar-hi els esmentats experiments. Tenint en compte la seva complexitat geomorfològica, controlada alhora per una gran quantitat de factors i variables a considerar (veure apartat 1.6.), s'ha fet precís establir a consciència criteris per tal d'eleger *blowouts* que es postulesin com a representatius a l'hora d'obtenir resultats òptims. En aquest sentit, el present treball passa per a experimentar sobre la dinàmica eòlica i sedimentària en *blowouts* localitzat al sistema dunar d'es Comú de Muro, Mallorca, i un segon localitzat a Cala Tirant, Menorca (Figura 45).



**Figura 45:** Localització geogràfica dels sistemes elegits per a desenvolupar la part experimental referida a la dinàmica eòlica i sedimentària en morfologies *blowout*.

L'elecció de les morfologies analitzades no és gratuïta, sinó que s'ha basat en considerar les característiques geomorfològiques i ecològiques associades a cada una d'elles, i sobretot, a les diferències intrínseques i extrínseques entre ambdues. En el primer cas es tracta d'un *blowout* de dimensions reduïdes, situat al front d'un sistema

dunar força fixat per la vegetació existent, i amb greus problemes d'erosió i conservació al llarg de la seva part frontal. A més, des d'un punt de vista eòlic no es troba en una zona de gran dinamisme, fet que en part ajuda i justifica la seva estabilitat sedimentària i geomorfològica. Les seves reduïdes dimensions fan també que l'espai entre la platja emergida i el propi *blowout* sigui escàs, i sense gaire interferència d'elements sòlids tals com vegetació herbàcia o presència de *echo dunes*.

En el cas de Cala Tirant la situació divergeix notablement de l'anterior. Es tracta d'un sistema molt més dinàmic, amb major quantitat de sediment disponible per a ser transportat, i amb unes condicions eòliques molt més elevades que en el cas anterior – influència dels vents de Tramuntana –. A més, la gradació del sistema presenta un millor estat de conservació, fet que fa que entre el límit superior de la platja alta i el inici de la morfologia *blowout* hi hagi una major distància, endemés d'elements que poden interferir en el flux eòlic i també, en els patrons sedimentaris.

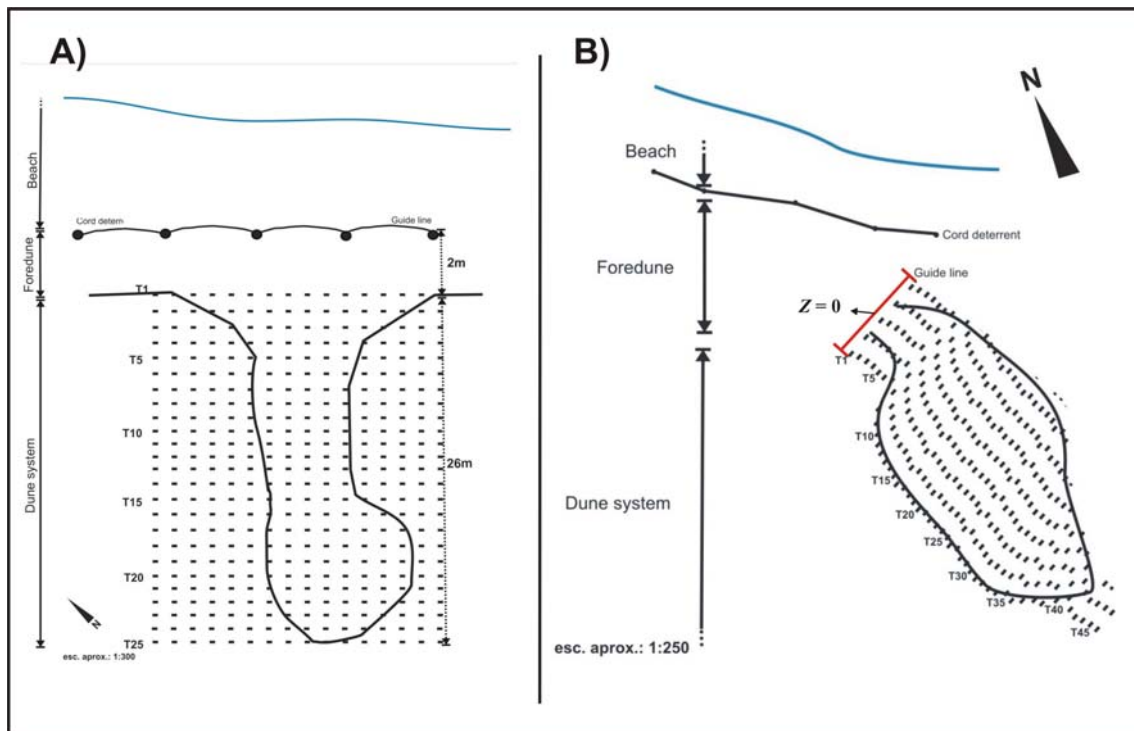
#### 2.4.2. Modelització digital del terreny (MDT) dels *blowouts*

L'aixecament topogràfic per a complir amb la modelització del flux eòlic dintre de les morfologies *blowout* seleccionades s'ha dut a terme a partir de l'aixecament de perfils topogràfics transversals i longitudinals al llarg de tota la seva superfície. Aquests s'han realitzat a través de la utilització d'un pantòmetre 1.5 x 1.5 o 0.5 x 0.5 seguint la metodologia ja explicada a l'epígraf 2.2.3. En aquest cas però, i a diferència del propòsit plantejat en l'epígraf esmentat anteriorment, la necessitat d'obtenir una topografia acurada de la morfologia en qüestió suposa que la recurrència espacial dels perfils sigui molt major.

Tal i com es reflecteix a la Figura 46A, en el *blowout* modelitzat en el cas del sistema d'es Comú de Muro (Mallorca) es van du a terme l'aixecament d'un total de 25 perfils transversals i 1 longitudinal, mentre que en el cas de Cala Tirant (Menorca) el número de perfils arriba a un total de 46 transversals i 1 de longitudinal.

Per a tal de modelitzar la topografia de cada una de les zones d'estudi en 3D, i fer-ho de la manera més acurada possible, en serà necessària la generació d'una base de dades quantitativa en la qual cada punt espacial de mostreig compti amb tres valors diferenciats; e.g. amplada (x), longitud (y) i profunditat (z). L'aixecament de perfils a partir de la utilització del pantòmetre *in situ* ens resol dos dels valors necessaris per a

tenir una tridimensionalitat en les dades que es necessiten ( $x, y$ ). No obstant, la dimensió referida a la profunditat ( $z$ ) encara ens manca per a resoldre.



**Figura 46:** Representació esquemàtica de la disposició de perfils topogràfics aixecats en els *blowouts* localitzats als sistemes d'es Comú de Muro (A) i Cala Tirant (B). Cada un dels perfils es realitza transversalment, amb una equidistància d'1 m.

Per a tal fi es traça – *in situ* al camp – una línia guia, totalment paral·lela a la direcció de cada un dels perfils que posteriorment s'aixecaran (Figura 46B). Així, a aquesta línia guia se li atorga el valor de  $z = 0$ . Tenint en compte doncs que la equidistància entre perfils és de 1 m, el valor de  $z$  per a cada un d'ells serà acumulatiu; e.g. perfil 1 ( $z = 1$ ) perfil 2 ( $z = 2$ ), perfil 3 ( $z = 3$ ), i així successivament. Un cop establerta la variable  $z$  cada un dels punts de mostreig ja compta amb els tres valors necessaris per a poder dur a terme l'aixecament topogràfic de les morfologies *blowout* en tres dimensions.

Amb tot, el nivell de resolució de la malla de punts generada – *mesh* – en els eixos  $x, y$  dependrà del pantòmetre utilitzat en cada cas, no obstant la majoria d'ells es manifesta en una resolució de 0.5 m. En el cas de la dimensió  $z$  aquesta es dona en 1 m (Taula 5).

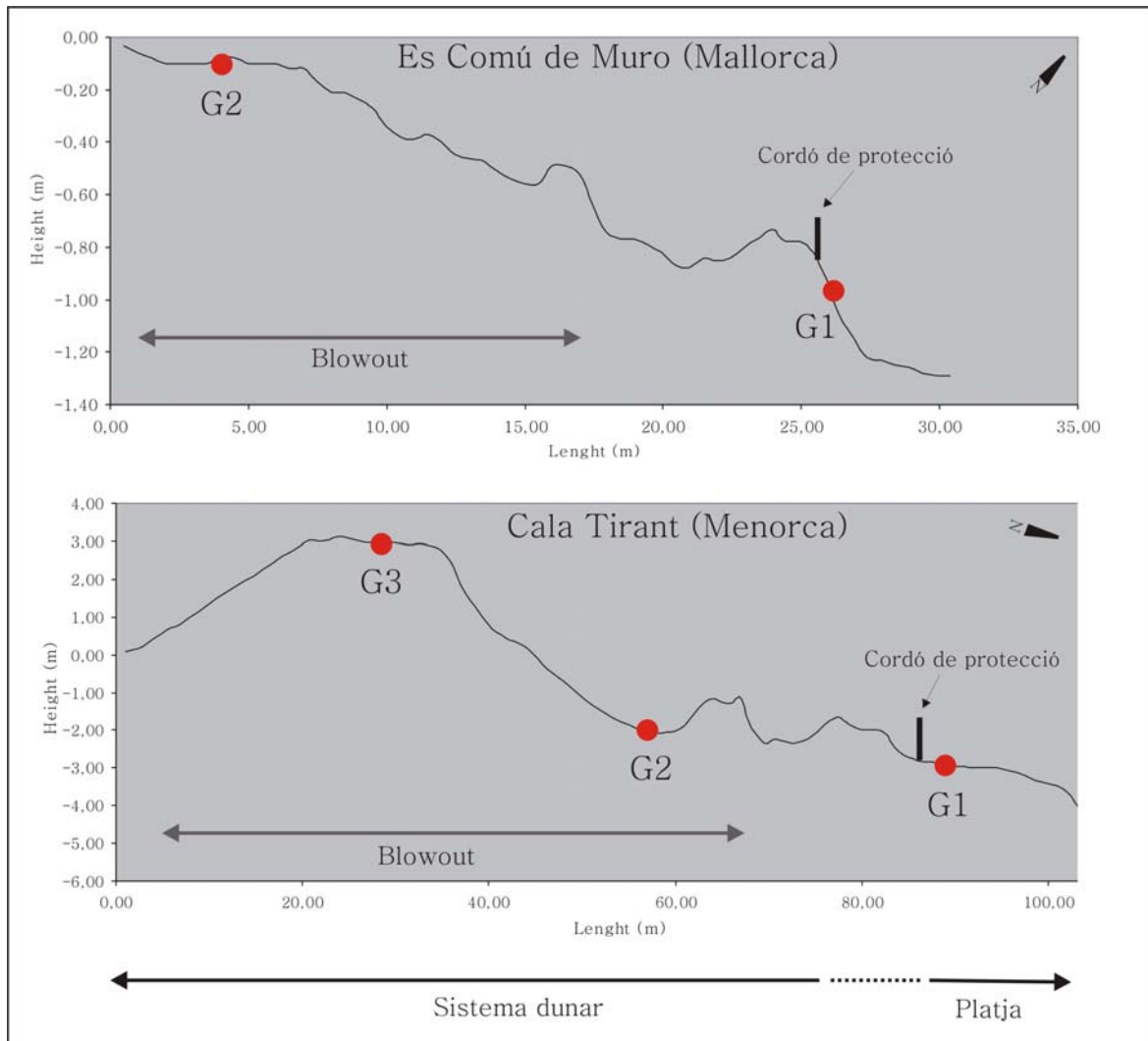
T1			T2			T3			...
X	Y	Z	X	Y	Z	X	Y	Z	
0.50	0.00	1	0.50	-0.02	2	0.50	-0.03	3	
0.99	-0.10	1	0.98	-0.15	2	0.98	-0.17	3	
1.48	-0.17	1	1.47	-0.27	2	1.46	-0.29	3	
1.97	-0.28	1	1.93	-0.46	2	1.92	-0.49	3	
...									

**Taula 5:** Representació reduïda de la base de dades generades per a la modelització digital de les morfologies *blowout* en 3D. A la taula apareixen les primers dades obtingudes en els 3 primers perfils aixecats al *blowout* de Cala Tirant.

La digitalització dels perfils topogràfics s'ha dut a terme amb AutoCad<sup>TM</sup>. No obstant, la informació processada ha estat exportada al software Cinema4D<sup>TM</sup> per a tal de dur a terme la vectorització corresponent i resolució de la malla final.

2.4.3. Caracterització granulomètrica i sedimentària

La caracterització sedimentària de les morfologies *blowout* estudiades es du a terme a partir del mostreig de sediment *in situ* i el seu posterior tractament en laboratori. En el cas del *blowout* localitzat a es Comú de Muro es prenen dues mostres, la primera localitzada al límit superior de la platja alta ( $G_1$ ), i una segona localitzada a la part més interior de la morfologia ( $G_2$ ). Pel que fa al cas de Cala Tirant, degudes les seves majors dimensions, s'agafen tres mostres; una primera, localitzada també al límit superior de la platja alta ( $G_1$ ), la segona dintre del *blowout*, en la seva plataforma de deflació ( $G_2$ ), i una tercera localitzada en el lòbul de deposició sedimentària ( $G_3$ ) (Figura 47).



**Figura 47:** Localització de les mostres d'arena agafades per a la caracterització sedimentària en els *blowouts* analitzats dels sistemes d'es Comú de Muro (adalt) i Cala Tirant (abaix).

De cada un dels punts de mostreig es recolliren 300 g de sediment per al seu posterior processament. Per a tal de disminuir al màxim l'error derivat a l'hora d'analitzar les seves característiques granulomètriques, cada una de les mostres fou eixugada per una estufa de dessecació (Figura 48, dreta) a una temperatura constant de 60 °C en períodes que, segons el grau d'humitat inicial, oscil·laven entre les 4-6 hores.



**Figura 48:** Imatges del instrumental utilitzat en laboratori. A la imatges esquerra la bàscula de precisió (error 0.01 g) per al pes de cada una de les mostres inicials, i de les fraccions granulomètriques derivades. A la dreta es mostra l'estufa de dessecació per eliminar el grau d'humitat de les mostres recollides al camp.



**Figura 49:** A l'esquerra es veu la pila de tamisos utilitzada per separar les fraccions granulomètriques del sediment analitzat, mentre que la imatge de la dreta mostra la tamisadora electromagnètica utilitzada per accelerar el procés de separació.

La caracterització morfomètrica del sediment es realitzà amb una bateria de sedassos de 21 cm de diàmetre, que amb una pila total de 6 compartiments, separà els grans d'arena en funció de la seva mida. L'obertura nominal dels compartiments utilitzats era de 1 mm, 500  $\mu$ , 250  $\mu$ , 125  $\mu$ , 63  $\mu$  i > 63  $\mu$  (Figura 49, esquerra). Per



sistematitzar el procés i obtenir una major precisió en la separació de fragments es passà el sedàs per una tamissadora electromagnètica per a granulometria, model CISA RP.08 (Figura 49, dreta), que amb una freqüència de microvibració recurrent al llarg de períodes de 10 minuts, impulsava la fragmentació i separació dels grans d'arena. El darrer pas del procés passa per obtenir el pes de cada una de les fraccions obtingudes. Així, amb una bàscula de precisió, model Sartorius BP 3100S (error de 0,01 g) (Figura 48, esquerra), es desglossà el pes de cada fracció.

El processament de les dades s'ha fet a través del software lliure *Gradistat*, utilitzat pel processament estadístic de la distribució en la mida de gra i l'anàlisi de sediment no consolidat, executat per Blott i Pye (2001). Aquest permet realitzar un acurat processament de mostres sedimentàries procedents de la fracció establerta per la utilització de tamisos granulomètrics. Els paràmetres granulomètrics del sediment mostrejat són calculats des del punt de vista aritmètic i geomètric – en micres ( $\mu$ ) –, i logarítmic – utilitzant l'escala de *phi* – (Taula 6). Cada mostra és processada a través del mètode per moments – *Method of Moments* – identificant les mitjanes – *mean* –, la desviació estàndars – *sorting* –, l'assimetria estadística – *skewness* – o la mitjana morfomètrica de les mostres – *kurtosis* – (Taula 7).

Mean diameter (mm)	<i>Phi</i> scale	Name
1	0	Very coarse sand
0.5	1	Coarse sand
0.25	2	Medium sand
0.125	3	Fine sand
0.0625	4	Very fine sand

**Taula 6:** Reconversió del diàmetre granulomètric de cap a l'escala de *phi*.

El post-processament de les mostres analitzades, deguda també la seva dimensió espacial, permeten establir patrons de relació i discriminació entre les distintes mostres preses en cada una de les morfologies estudiades, tot relacionant-ho amb les dades de vent, transport, erosió i sedimentació derivades dels experiments realitzats al camp.

**Table 1.** *Statistical formulae used in the calculation of grain size parameters.*  
*f* is the frequency in percent; *m* is the mid-point of each class interval in metric ( $m_m$ ) or phi ( $m_\phi$ ) units;  $P_x$  and  $\phi_x$  are grain diameters, in metric or phi units respectively, at the cumulative percentile value of *x*.

## (a) Arithmetic Method of Moments

Mean	Standard Deviation	Skewness	Kurtosis
$\bar{x}_a = \frac{\sum f m_m}{100}$	$\sigma_a = \sqrt{\frac{\sum f (m_m - \bar{x}_a)^2}{100}}$	$Sk_a = \frac{\sum f (m_m - \bar{x}_a)^3}{100\sigma_a^3}$	$K_a = \frac{\sum f (m_m - \bar{x}_a)^4}{100\sigma_a^4}$

## (b) Geometric Method of Moments

Mean	Standard Deviation	Skewness	Kurtosis
$\exp \frac{\sum f \ln m_m}{100}$	$\sigma_g = \exp \sqrt{\frac{\sum f (\ln m_m - \ln \bar{x}_g)^2}{100}}$	$Sk_g = \frac{\sum f (\ln m_m - \ln \bar{x}_g)^3}{100 \ln \sigma_g^3}$	$K_g = \frac{\sum f (\ln m_m - \ln \bar{x}_g)^4}{100 \ln \sigma_g^4}$

Sorting ( $\sigma_g$ )	Skewness ( $Sk_g$ )	Kurtosis ( $K_g$ )
well sorted	< 1.27	Very fine skewed
sorted	1.27 – 1.41	Fine skewed
rately well sorted	1.41 – 1.62	Symmetrical
rately sorted	1.62 – 2.00	Coarse skewed
y sorted	2.00 – 4.00	Very coarse skewed
poorly sorted	4.00 – 16.00	
mely poorly sorted	> 16.00	

## (c) Logarithmic Method of Moments

Mean	Standard Deviation	Skewness	Kurtosis
$\bar{x}_\phi = \frac{\sum f m_\phi}{100}$	$\sigma_\phi = \sqrt{\frac{\sum f (m_\phi - \bar{x}_\phi)^2}{100}}$	$Sk_\phi = \frac{\sum f (m_\phi - \bar{x}_\phi)^3}{100\sigma_\phi^3}$	$K_\phi = \frac{\sum f (m_\phi - \bar{x}_\phi)^4}{100\sigma_\phi^4}$

Sorting ( $\sigma_\phi$ )	Skewness ( $Sk_\phi$ )	Kurtosis ( $K_\phi$ )
well sorted	< 0.35	Very fine skewed
sorted	0.35 – 0.50	Fine skewed
rately well sorted	0.50 – 0.70	Symmetrical
rately sorted	0.70 – 1.00	Coarse skewed
y sorted	1.00 – 2.00	Very coarse skewed
poorly sorted	2.00 – 4.00	
mely poorly sorted	> 4.00	

**Taula 7:** Metodologia utilitzada pel software GRADISTAT en tant al càlcul estadístic de la granulometria de les mostres analitzades.

#### 2.4.4. Dinàmica eòlica

##### *2.4.4.1. Experiments i instrumentació*

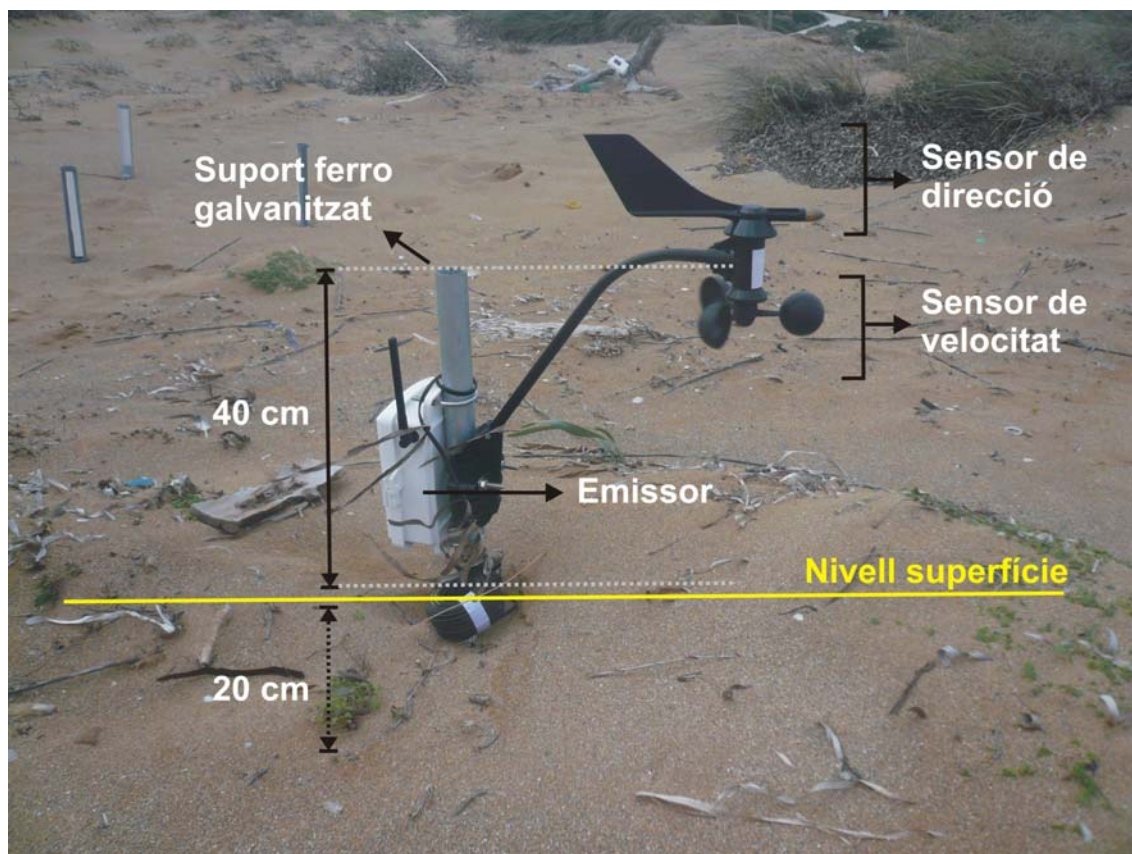
Es duen a terme un total de tres experiments per a tal d'incrementar el coneixement sobre la dinàmica eòlica i sedimentària dintre de morfologies *blowout* localitzades en la primera línia d'alguns sistemes platja-duna a les illes de Mallorca i Menorca (Illes Balears). Cada una de les campanyes compta amb dades de mostreig al llarg de 24 h. El cas de Cala Tirant (Menorca) compta amb dues campanyes, una a l'hivern, sota condicions energètiques mitjanes-altes, i una altra a l'estiu, sota condicions energètiques més calmades. El cas d'es Comú de Muro (Mallorca), tot i inicialment estar planificat de la mateixa manera – fer dues campanyes –, al final només ha pogut comptar amb una, ja que per motius externs no s'han pogut aconseguir els permisos necessaris per a la retirada de les mesures de gestió aplicades entre el primer experiment i el que, hipotèticament, estava planificat fer sota condicions d'alta energia (Taula 8). Amb aquest escenari, l'experiment planificat no es va poder dur a terme posat a que la situació actual del *blowout* no permet establir-ne una òptima caracterització eòlica, i molt manco comparar ambdues situacions, com sí s'ha pogut fer en el cas de Menorca. És per aquest motiu que al capítol 6, centrat amb la gestió, es fa una anàlisi i valoració de l'estat actual del *blowout* i de l'eficiència de les mesures de gestió aplicades (veure més a l'apartat 6.3.).

<b>Sistema</b>	<b>Estació</b>	<b>Dies</b>
<b>Es Comú de Muro</b>		
Illa: Mallorca	Estiu	27-28 juny de 2012
<b>Cala Tirant</b>		
Illa: Menorca	Hivern	17-18 gener de 2013
	Estiu	04-05 setembre de 2012

**Taula 8:** Calendari de les campanyes de camp per a l'estudi de la dinàmica eòlica i sedimentària en els *blowouts* de Cala Tirant i es Comú de Muro.

El plantejament experimental i instrumental en tant a l'estudi de la dinàmica eòlica existent dintre de les morfologies *blowout* estudiades i de la seva caracterització passa, inicialment, per aconseguir una informació quantitativa del flux de vents amb la major cobertura espacial possible. L'objectiu dels experiments realitzats als *blowouts*

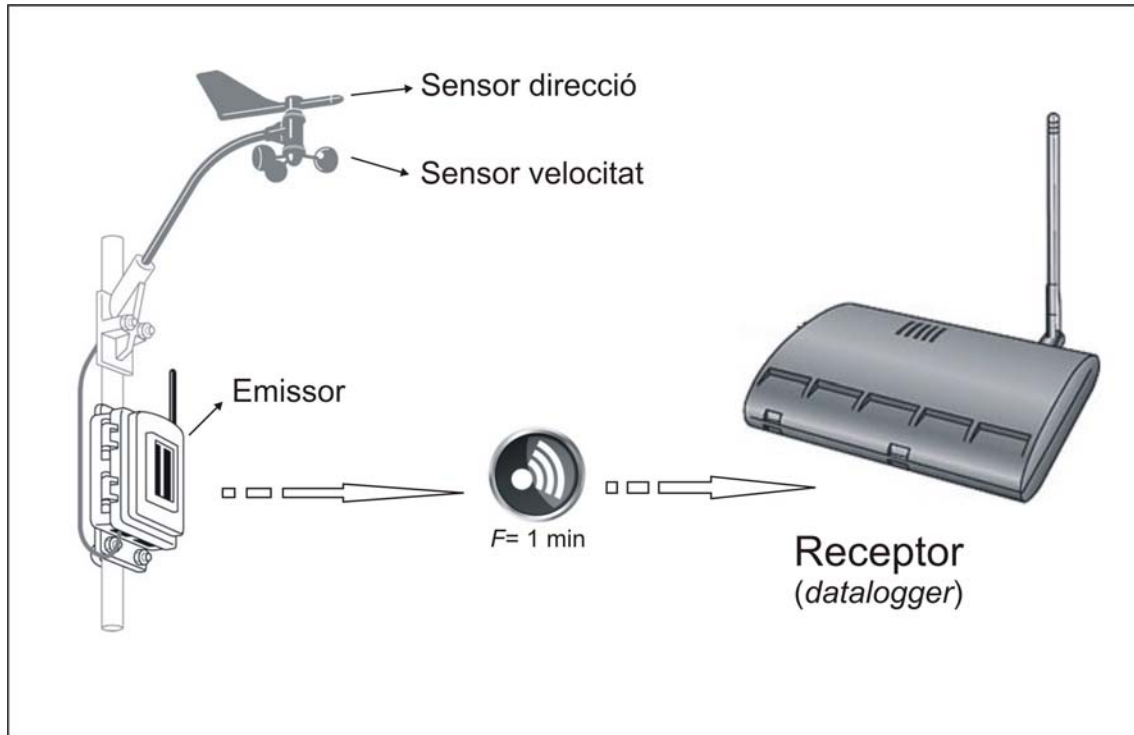
localitzats als sistemes d'es Comú de Muro (Mallorca) i a Cala Tirant (Menorca) passa per a conèixer, amb la màxima resolució possible, el comportament del flux eòlic en superfície, un cop aquest entra dins de la pròpia morfologia, així com també al seu voltant.



**Figura 50:** Disposició i estructura dels anemòmetres utilitzats per a la caracterització del flux eòlic dintre de les morfologies *blowout* analitzades.

Per a tal fi s'utilitza una xarxa d'anemòmetres *Davis 2D* (Figura 50) – velocitat i direcció – distribuïts al llarg de cada un dels *blowouts* anteriorment esmentats. Cada un dels anemòmetres està compost per dos sensors diferents; a) un sensor de 3 cubetes – 3 *cups* – el qual mesura la velocitat del vent, i b) una ploma – *veleta* –, la qual mesura la direcció del flux. Els sensors de vent són disposats en superfície, amb l'ajuda d'un mànstil de ferro galvanitzat de 60 cm de longitud, dels qual 20 cm estan enterrats i els 40 cm restants es troben per a sobre de la superfície (Figura 50). Cada dispositiu compte dels dos sensors abans esmentats, ambdós connectats a un emissor el qual, inalàmbriament envia les dades a un receptor central – *datalogger* – *Danvis Envoy8x* (Figura 51). Abans de començar amb les recollida de dades, cada anemòmetre és

calibrat i anivellat correctament vers a la superfície, endemés d'orientat cap al Nord geogràfic per a tal disminuir al màxim els desajustaments provocats per la pròpia topografia i irregularitat.

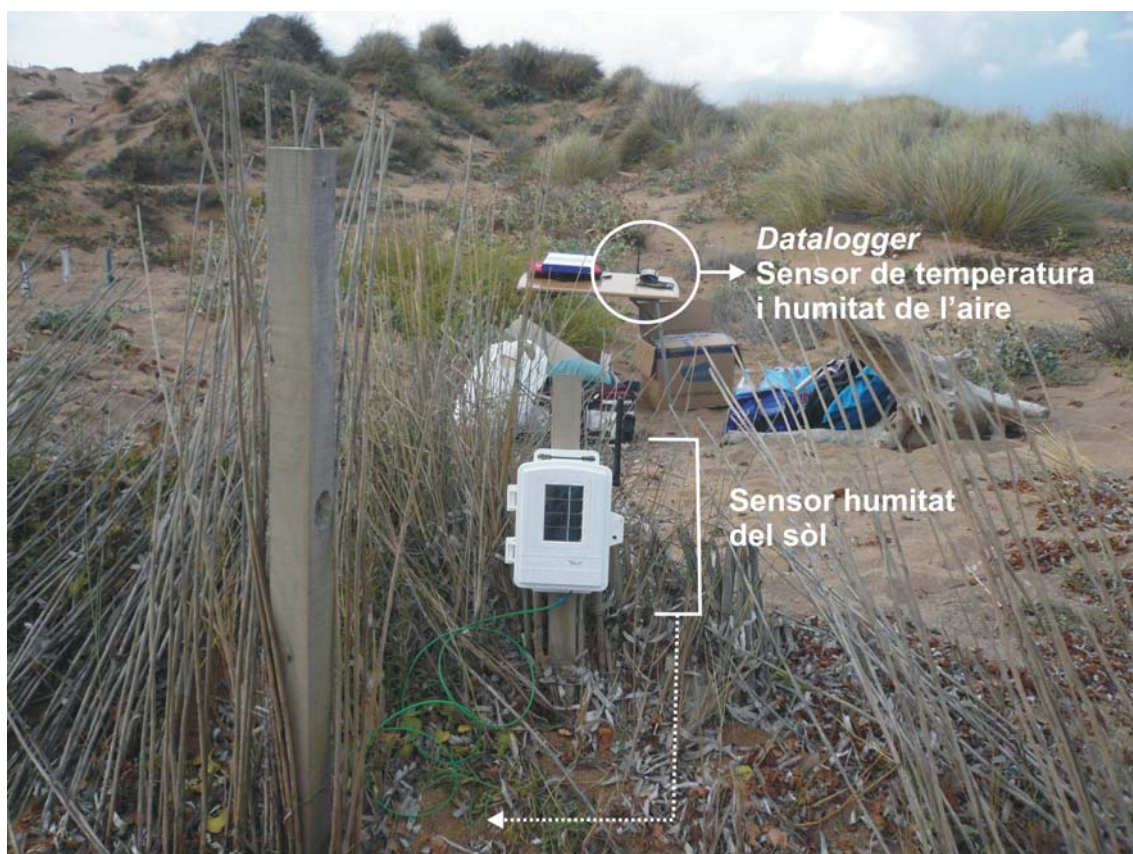


**Figura 51:** Representació esquemàtica (sense escala) del funcionament dels sensors de vent utilitzats i de la seva interconnexió amb el receptor principal encarregat d'emmagatzemar les dades. Cada un dels anemòmetres disposats compta amb un emissor el qual, amb una freqüència d'1 min envia les dades (sense fil) al receptor central (*datalogger*).

La mesura del comportament eòlic com a variable principal en tant a poder conèixer la dinàmica eòlica també ha estat completada pel mostreig d'altres variables atmosfèriques i físiques tals com la temperatura i humitat atmosfèrica, així com la humitat del sòl (Figura 52). Els sensors destinats a mesurar la temperatura i humitat ambiental estan inserits dins del dispositiu que també comporta el receptor central – *datalogger* –, mentre que el sensor d'humitat del sòl consta d'una sonda enterrada en superfície (2 cm) i un emissor que, a l'igual que amb els anemòmetres, envia la informació mostrejada al *datalogger*.

La freqüència de mostreig i processament de dades per a cada un dels sensors utilitzats – tant els anemòmetres com els sensors de temperatura i humitat – ha estat d'1 min al llarg de 24 hores de mostreig en cada una de les campanyes de camp realitzades. En el cas dels sensors de vent, cada un d'ells emet la informació referida a la velocitat

del vent mitja, màxima velocitat, direcció mitja, i la direcció en el moment de màxima velocitat al llarg de cada període de mostreig (1 min). La informació referent a la velocitat l'expressa en  $\text{ms}^{-1}$ , mentre que la referida a la direcció ho fa en termes alfabètics – per la qual cosa després n'ha estat necessària la transformació a informació quantitativa, expressada en graus –. La temperatura atmosfèrica es exportada en graus centígrads ( $^{\circ}\text{C}$ ), i la humitat en %.



**Figura 52:** A la part inferior de la imatge es veu el sensor utilitzat per a mesurar la humitat del sòl, el qual consta d'una sonda enterrada a prop de la superfície (2 cm) i un emissor. A la part superior de la imatge el receptor central – *datalogger* – el qual rep la senyal de cada un dels sensors esmentats. Endemés du incorporats els sensors per a la mesura de la humitat i temperatura atmosfèrica.

Els sensors s'han disposat seguint criteris geomorfològics – a partir de les característiques mostrades pels *blowouts* en qüestió –, i pensant amb el processament de dades referents a; a) la modelització del flux eòlic, b) l'aixecament de perfils longitudinals de vent o *Fractional speed-up ratio* (veure epígraf 2.4.4.2.), i c) la relació entre dinàmica eòlica i dinàmica sedimentària.

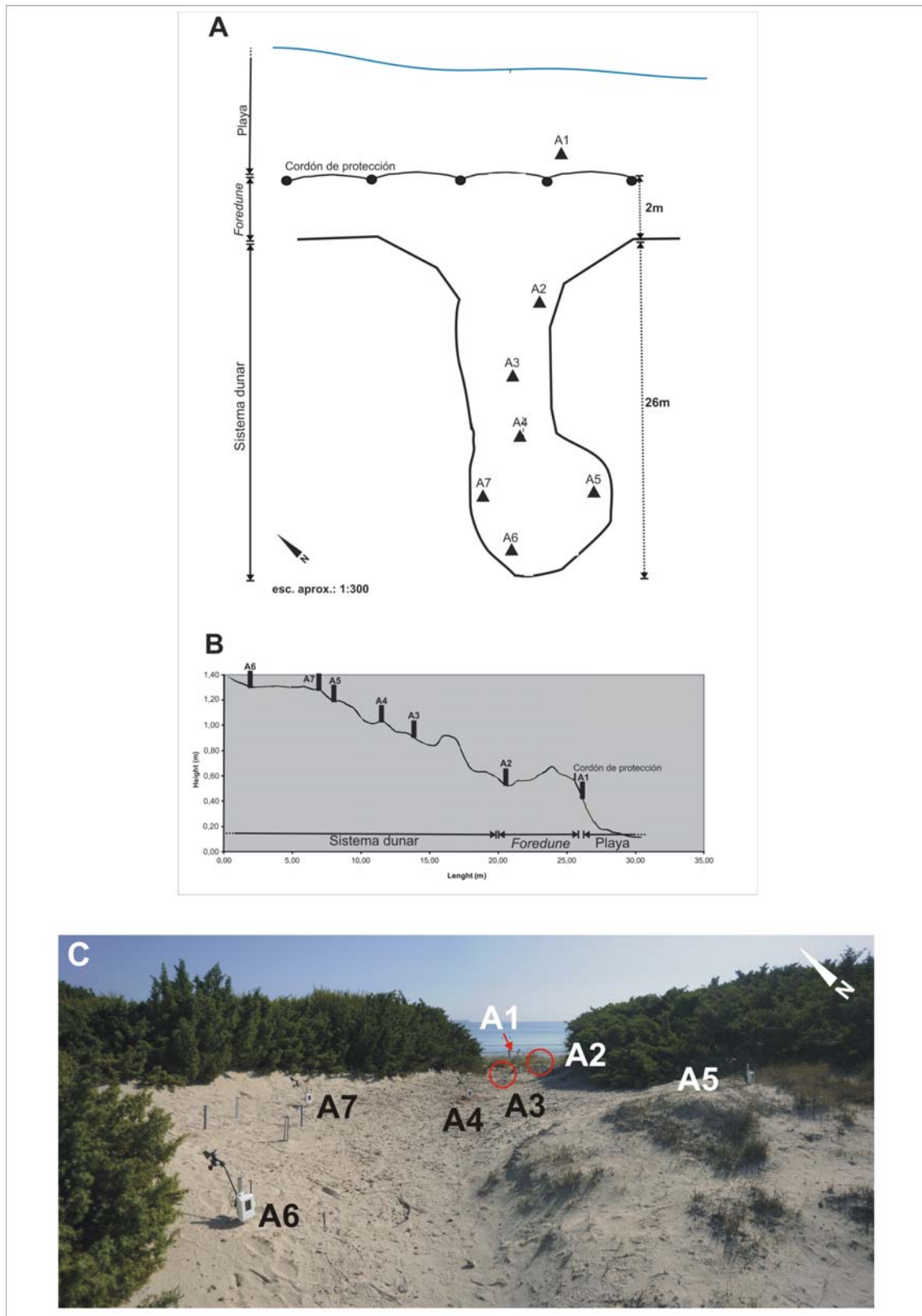
La modelització del flux dintre de la morfologia suposa que la cobertura espacial dels sensors sigui la més ampla possible. Endemés, les característiques morfològiques

intrínseques – e.g. boca, parets laterals, lòbul de deposició, etc. – i extrínseques – presència d'*echo* dunes, vegetació, etc. – del *blowout* també juguen un paper important vers a la localització òptima d'aquests. Pel que fa al segon dels criteris, i com ja s'explicarà amb més detall a l'epígraf 2.4.4.2., l'aixecament de perfils longitudinals de vent dintre del *blowout* requereix de la disposició alineada d'alguns dels sensors, fet que permetrà homogeneïtzar les dades de vent en distints punts. Finalment, sent un dels objectius de la present tesi establir-se com un dels primers referents en relacionar dades de vent i de transport sedimentari preses en un mateix moment, es fa necessari que la localització d'alguns dels sensors de vent es correspongui amb el punts de mostreig de transport, establint-se així com els anemòmetres de referència per a poder relacionar ambdues variables (veure més a l'epígraf 2.4.5.1.).

Pel que fa al *blowout* situat al sistema d'es Comú de Muro (Figura 53A i B), 1 dels sensors es localitza al límit de la platja alta (A1), tot per mesurar les condicions amb les que el vent arriba a la primera línia de duna – direcció i velocitat –. En aquest punt el vent arriba totalment “verge”, ja que no hi ha cap element sòlid – a excepció de la rugositat de l'arena – que interfereixi en el seu comportament.

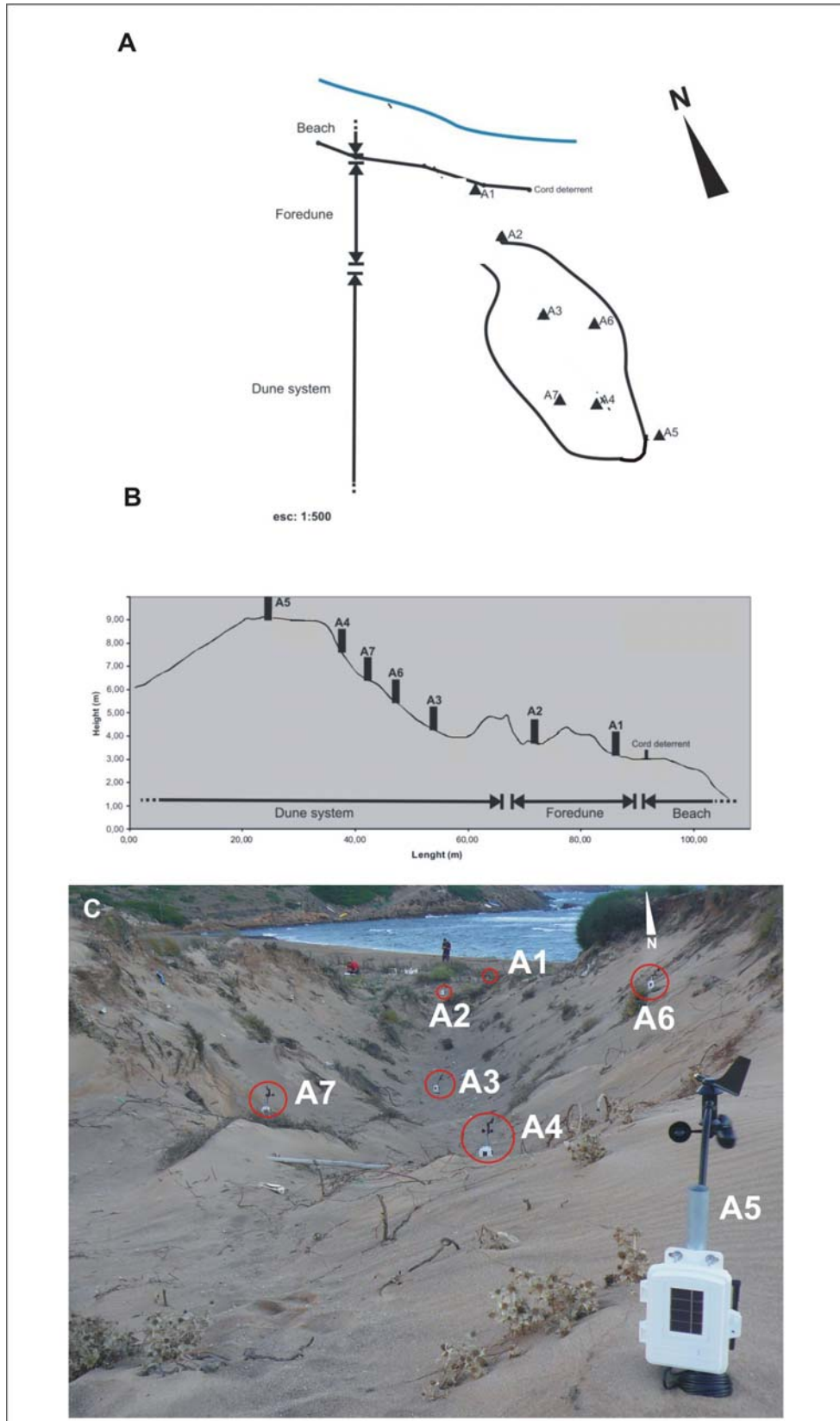
Els 6 sensors que resten es localitzen, ja, dintre de la morfologia en sí. Tal i com es reflecteix a la Figura 53C, la presència d'una important massa de vegetació llenyosa-arbustiva delimita força els marges del *blowout*. En aquest sentit, la disposició de 6 anemòmetres en el seu interior ens permetrà conèixer quin és el comportament del flux una vegada aquest entre dintre del *blowout*, i quina interferència hi pugui tenir la massa vegetal limítrofa. En aquest sentit 3 sensors (A2, A3, A4) es situen al llarg de la cubeta de deflació, tot per incidir en el comportament del flux una vegada canalitzat. Finalment, els 3 restants (A5, A6, A7) es localitzen a la part més interior de la morfologia, la qual es podria correspondre a la zona d'alliberament i deposició. Així, i seguint la morfologia circular mostrada, es localitzen al límit entre la superfície d'arena i la massa vegetal existent.

D'altra banda, i com bé queda reflectit a la Figura 53B, la disposició dels anemòmetres 1 i 2 queda condicionada pel possible efecte que la presència de morfologies arenoses efímeres, o bé de vegetació psammòfila en primera línia, puguin tenir vers a possibles canvis de comportament eòlic, principalment envers a la modificació de la velocitat del flux. Així doncs, l'A1 es localitza abans de la zona amb una superfície més rugosa, mentre que l'A2 ho fa a la part posterior.



**Figura 53:** Disposició i localització dels anemòmetres despleats en la campanya realitzada al *blowout* d'es Comú de Muro (Mallorca). A la figura A un esquema en planta de la localització de cada un dels sensors, al B la seva localització vista en perfil – sobre el perfil topogràfic – longitudinal del *blowout*, i al C una imatge presa *in situ* al camp, al llarg de l'experiment.





**Figura 54:** Disposició i localització dels anemòmetres desplegats en les campanyes realitzades al *blowout* de Cala Tirant (Menorca). A la figura A un esquema en planta de la localització de cada un dels sensors, al B la seva localització vista en perfil – sobre el perfil topogràfic – longitudinal del *blowout*, i al C una imatge presa *in situ* al camp, al llarg de l'experiment.

El cas de Cala Tirant (Figura 54) no discerneix força del cas anteriorment explicat, no obstant les diferències morfològiques associades en suposen alguns matisos a tenir en compte vers a la disposició dels sensors de vent. En aquest cas 2 dels anemòmetres (A1, A2) es localitzen fora de la morfologia en sí, concretament entre el límit superior de la platja alta (A1) i la part posterior de la línia de *foredune* (A2). En aquest cas, la major distància existent entre la platja emergida i l'inici del *blowout*, així com la major complexitat geomorfològica mostrada en primera línia fan que sigui important conèixer el flux – i les diferències derivades – en aquesta primera franja. Així, l'A1, tal i com es postulava en el cas d'es Comú, s'estableix com el sensor per a mesurar el flux un cop aquest arriba de la mar. No obstant, l'A2 ho caracteritzarà un cop aquest hagi passat la resistència mostrada per les *echo dunes* i la vegetació herbàcia existent. En aquest cas també, l'A1 rebrà el flux sense interferència exercida per cap objecte sòlid, el qual doncs permetrà conèixer les condicions inicials en el que el vent incideix, primer sobre la platja alta, i després s'endinsa de cap al sistema de dunes associat.

Les característiques morfològiques mostrades en aquest cas indiquen que el control exercit per la topografia interior és notable. Així, 4 dels anemòmetres es localitzen dintre de la morfologia en sí (Figura 54A). L'A3 es localitza de ple dins la cubeta de deflació, tot mesurant el flux en superfície una vegada aquest ja ha entrat dins la zona deprimida associada al *blowout*, mentre que l'A4 es situa a la rampa interior, abans de que el flux abandoni de nou la cubeta de deflació, moment en que troba l'A5, localitzat a l'inici del lòbul de deposició. Finalment, els dos anemòmetres que resten es troben instal·lat a les dues parets laterals. L'A6 es troba a la paret est, mentre que l'A7 ho fa a la paret oest.

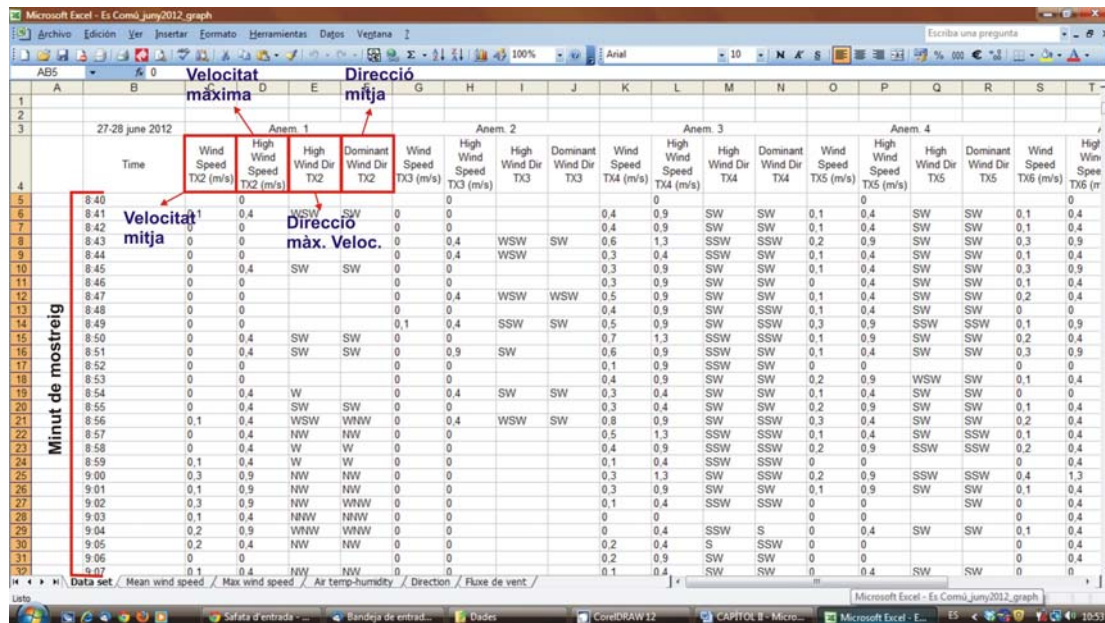
En aquest cas els anemòmetres A1, A2, A3, A4 i A5 es troben disposats amb una mateixa alineació per a tal d'establir-se com el patró a l'hora de l'aixecament de perfils longitudinals de vent (Figura 54C) (veure més a l'epígraf 2.4.4.2.).

#### 2.4.4.2. Tractament de dades

El software WeatherData Transfer Utility™ ha estat el utilitzat per a descarregar la base de dades – *dataset* – emmagatzemada pel *datalogger* Envoy8X. Un cop descarregades les dades referides al mostreig de vent pels 7 sensors al llarg de 24 h,

aquestes s'han exportat a un processador de dades convencional Excel a partir del qual s'ha dut a terme tot el seu posterior processament. La base de dades inicial compta amb la informació de cada un dels sensors amb freqüència d'1 min pel que fa a la velocitat mitjana, la màxima velocitat, la direcció mitja i la direcció en el moment de màxima velocitat (Figura 55).

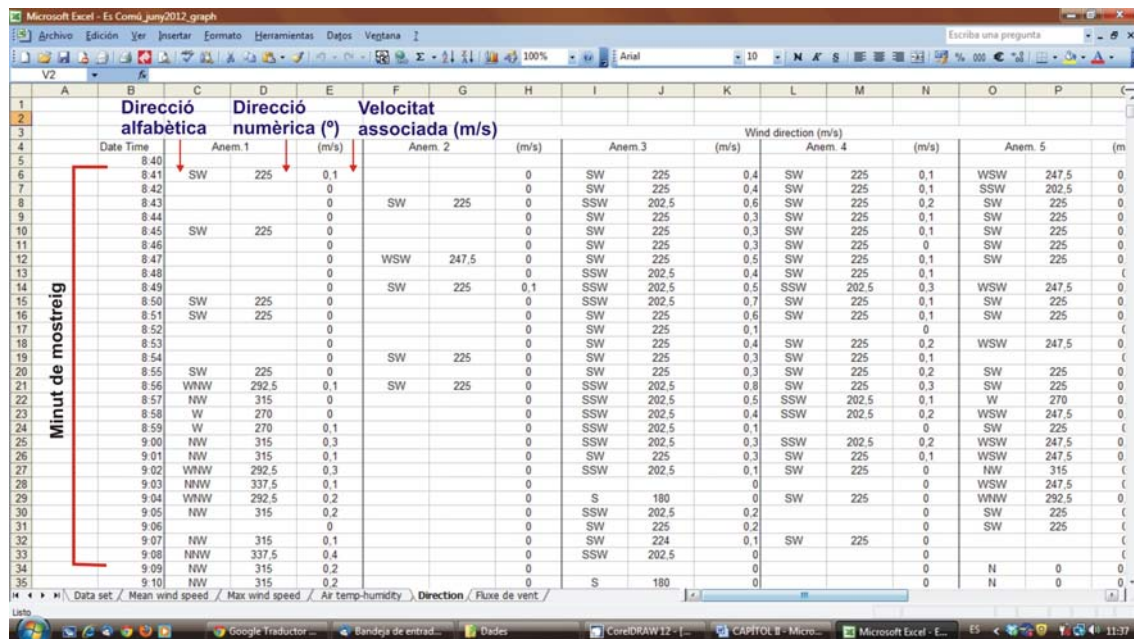
La distribució espacial i temporal de la velocitat del vent s'ha processat utilitzant les dades referides a la velocitat mitjana en primer lloc, i la velocitat màxima en segona instància. El resultat en són els respectius gràfics bidimensionals que relacionen la velocitat del vent al llarg de les 24 h de mostreig amb cada un dels sensors, permetent així veure les diferències espacials i temporals associades. Aquestes gràfiques són també relacionades amb la temperatura i la humitat atmosfèrica registrada. Endemés, amb l'objectiu de conèixer les condicions atmosfèriques donades al llarg de cada experiment aquestes dues darreres variables – temperatura i humitat ambiental – també són relacionades entre sí.



**Figura 55:** Exemple de la interfície mostrada per la base de dades un cop aquestes han estat exportades al processador de dades Excel. La mateixa seqüència de dades es repeteix per cada un dels sensors al llarg de les 24 hores de mostreig en cada experiment dut a terme.

Pel que fa a la direcció, el software *WeatherData Transfer Utility*<sup>TM</sup> exporta les dades en termes alfabètics per la qual cosa, un cop aquestes dins el processador Excel, són reconvertides en termes quantitativs, al temps que relacionades amb la direcció mitjana del vent pel mateix moment de mostreig. Un cop la informació talment

ordenada, es processa amb la generació de gràfics bidimensionals que relacionen directament la velocitat del vent i la seva direcció per a cada un dels anemòmetres al llarg de les 24 h de mostreig (Figura 56).



**Figura 56:** Interfície de la base de dades referides a la direcció de vent registrada pels diferents sensors al llarg de tota la freqüència de mostreig.

Endemés del processament simple de la base de dades referides a la velocitat i direcció del vent registrades en cada un dels experiments duts a terme, l'anàlisi és complementada a partir de l'estandardització de la velocitat del vent prenent en consideració les variables altura i condicions topogràfiques mostrades pels *blowouts* en qüestió, partint del postulat per Jackson i Hunt (1975) i posteriorment aplicat per Hugenholtz i Wolfe (2009).

Per a tal fi, tal i com ja es mencionava a l'epígraf 2.4.4.1., la disposició de part dels anemòmetres instal·lats en les respectives morfologies s'associa a la generació de perfils longitudinals de vent tenint en compte les dues variables anteriorment esmentades. En el cas d'estudi d'es Comú de Muro, i com queda reflectit a la Figura 53A, els anemòmetres 1, 2, 3, 4 i 6 es disposen de forma alineada, mentre que en el cas de Cala Tirant el perfil serà estipulat a partir dels anemòmetres 1, 2, 3, 4 i 5 (Figura 54A). Amb la finalitat d'estandarditzar les dades en cada un dels punts esmentats s'utilitza un anemòmetre de referència que, en ambdós casos, esdevé l'anemòmetre 1 – zona d'input i condicions inicials –. Aquest permetrà doncs

equiparar la velocitat registrada per cada anemòmetre a partir de la velocitat de vent a una altura fixa; 0.5 m en el cas d'es Comú (Figura 53B) i 3 m en el cas de Cala Tirant (Figura 54B).

Un cop seleccionada la informació, les dades de vent per a cada un dels anemòmetres són ordenades per moments – *runs* – amb una durada de 20 min cada un. Per a cada un dels *runs* es contempla la velocitat mitjana del vent registrada per a cada anemòmetre al llarg del període de mostreig – 20 min –.

La generació dels perfils longitudinals es calcula a partir del *Fractional speed-up ratio* ( $\delta s$ ) definit per Hugenholtz i Wolfe (2009) el qual s'estipula:

$$\delta s = [u_z - U_z] / U_z$$

a on  $u_z$  és la velocitat del vent registrada a una determinada altura – la que determina cada un dels anemòmetres utilitzats per a calcular el perfil longitudinal –, i  $U_z$  és la velocitat del vent registrada a l'altura fixa proporcionada per l'anemòmetre de referència. L'aplicació del *Fractional speed-up ratio* proporciona informació mètrica per analitzar els canvis de la velocitat del vent en els diferents punts mostrejats – equivalents a cada un dels anemòmetres utilitzats –, endemés de veure la interferència que elements com la vegetació herbàcia en primera línia en puguin derivar.

#### 2.4.5. Dinàmica sedimentària

##### *2.4.5.1. Experiments i instrumentació*

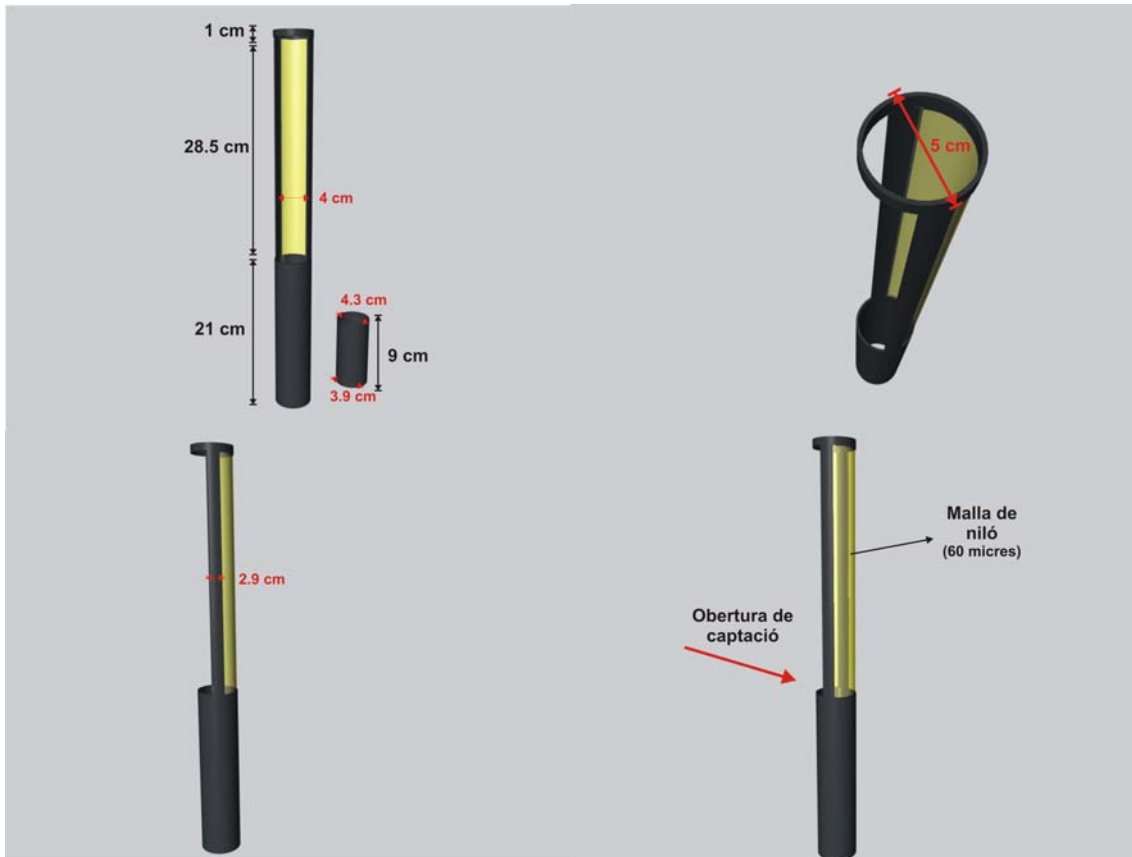
El plantejament experimental pel que fa al càlcul del transport sedimentari al llarg de les campanyes de camp realitzades està íntimament relacionat amb el comportament eòlic registrat. Així doncs, des del punt de vista experimental hi ha una sinèrgia entre les dues variables; vent i transport. Tal i com ja s'explicava al principi de l'epígraf 2.4.4.1. i a la Taula 8, es calcula el transport sedimentari associat als *blowouts* estudiats en els sistemes d'es Comú de Muro (Mallorca) i Cala Tirant (Menorca) en condicions energètiques diferents. Així, en la present tesi es presenten també les dades referides al transport sedimentari al llarg de 3 campanyes de camp, cada una d'elles amb una duració de 24 h.

Tal i com també ja s'ha mencionat en algun punt anteriorment, el present treball es postula com a pioner en tant a relacionar dades de transport i condicions eòliques preses en sinèrgia espacial i temporal. És per aquest motiu doncs que el plantejament metodològic referent al mostreig del transport de sediment associat anirà íntimament lligat al mostreig eòlic ja explicat.

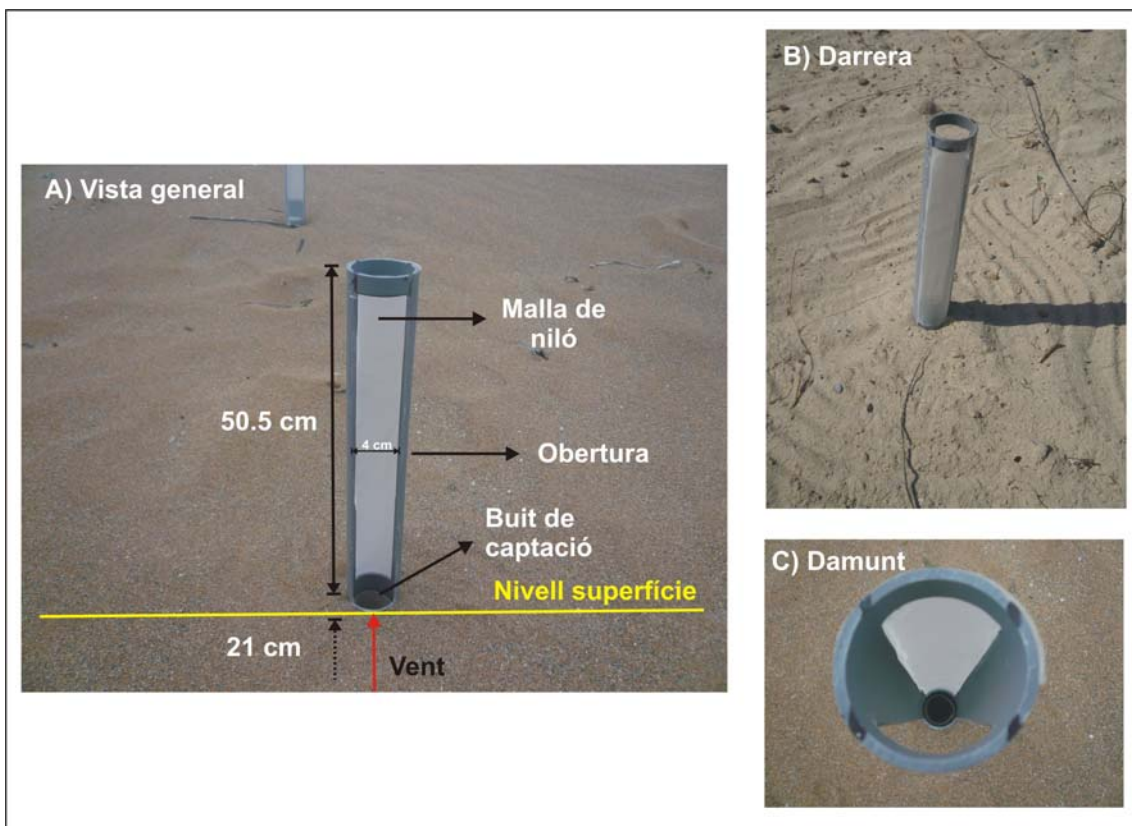
Tot i que en són varis i diferents els sistemes i mètodes que avui dia existeixen per a calcular i caracteritzar els patrons de transport de sediment en àmbits eòlics (Goossens et al., 2000), en el treball que ens ocupa han estat utilitzades en cada un dels experiments un total de 12 trampes verticals basades en el model i disseny postulat per Leatherman (1978). A part de ser un disseny fàcil a l'hora de construir i posteriorment instal·lar al terreny, un dels factors que ha pesat en la seva elecció ha estat que permeten la comparació amb altres estudis ja duts a terme per diversos autors arreu (Sarre, 1987; Gares, 1992; Sherman et al., 1998; Sabatier et al., 2000; Cabrera i Alonso, 2010). No obstant cap dir també que alguns autors tals com Delgado-Fernández (2011) sugereixen alguns inconvenients derivats de la seva utilització; e.g. que en períodes llargs de mostreig les trampes han de ser buidades amb recurrència, o bé Davidson-Arnott i Law (1990) postulant que en condicions a on l'arena conté alts nivells d'humitats aquestes poden tenir a obstructir-se, disminuint així la seva eficiència. No obstant, i pel cas que ens ocupa, cap de les dues situacions esmentades es donen.

Les trampes estan construïdes a partir de tubs de PVC amb una longitud total de 50.5 cm i 5 cm de diàmetre. Cada una d'elles compta amb dues obertures en la seva part superior, de 4 cm per 28.5 cm, ambdues anteposades entre sí. Al seu interior s'hi disposarà el tub de captació sedimentaria, construït a partir d'un tub plastificat de 9 cm de longitud i un diàmetre variable de 4.3 cm en la seva part superior i 3.9 cm en la seva base (Figura 57).

Del total de la seva longitud, 29.5 cm esdevindran la part aèria de la trampa, mentre que els 21 cm restants estaran sota terra. Tal i com es mostra a les Figures 57 i 58A, una de les obertures superiors – la situada a sotavent – es troba lliure, mentre que l'altra – orientada a sobrevent – es troba coberta amb una malla de niló de 60  $\mu$ m. Així doncs, i a partir de la orientació de la trampa, l'obertura de sotavent esdevindrà l'obertura de captació sedimentària, mentre que la de sobrevent evitarà que el sediment torni a sortir de la trampa. Un cop el sediment precipita dintre de la trampa, aquest queda dipositat dins una bossa de mostreig situada a la part interior que, un cop es pretengui, podrà ser retirada sense haver de treure la trampa en tota la seva totalitat.

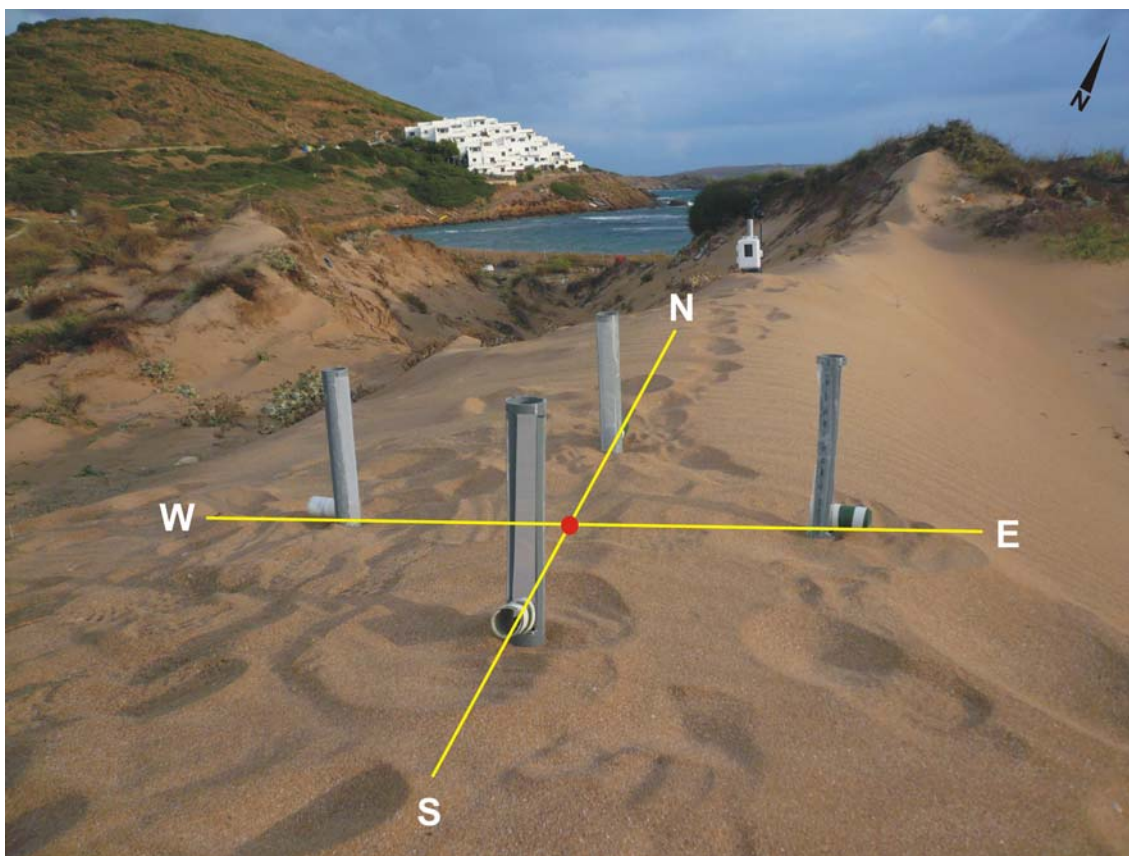


**Figura 57:** Plànol esquemàtic de les trapes de sediment vertical basades en el model de Leatherman (1978) utilitzades pels experiments de dinàmica sedimentària.



**Figura 58:** Disposició i estructura de les trapes utilitzades per a la caracterització del transport de sediment dintre de les morfologies *blowout* analitzades.

Si bé cada una de les trampes té una obertura lliure per la qual es deposita el sediment transportat per la força del vent, el problema derivat que aquests tipus de trampes tenen si es disposen de manera individual és que, subjectes a la direcció del flux incident, poden incrementar exponencialment el seu grau d'imprecisió – e.g. si una trampa està orientada cap al nord, i el vent incident és de sud, la seva capacitat de retenció és gairebé nul·la –. Al tractar-se de morfologies tant complexes des del punt de vista geomorfològic, i d'ambients a on el comportament del flux eòlic és tan imprevisible com incontrolable, les trampes es disposen en grups de 4 trampes individuals, cada una d'elles orientades – la seva obertura de sotavent – als 4 principals punts cardinals (N, S, E, O) per tal d'aconseguir així trampes multidireccionals (Figura 59).

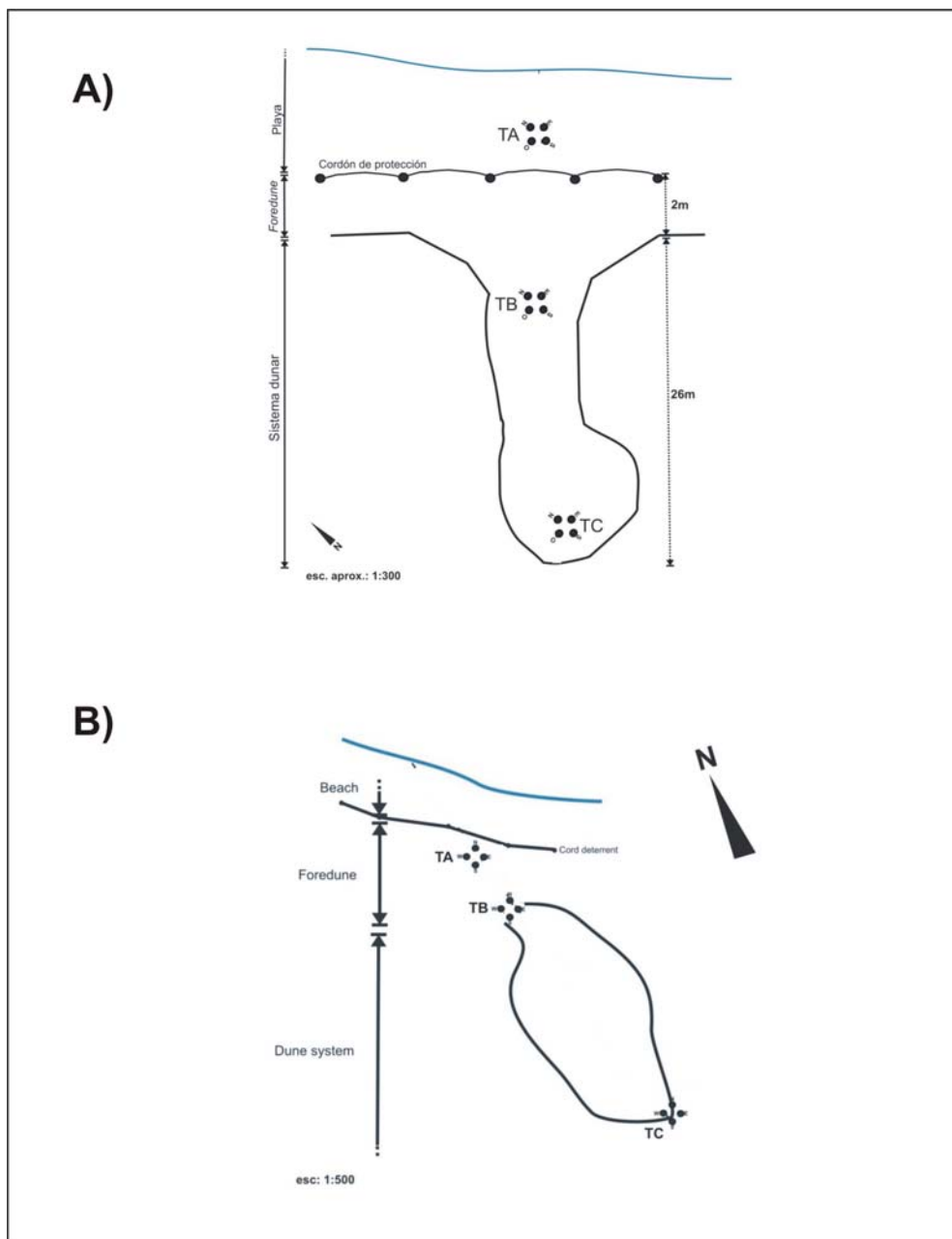


**Figura 59:** Disposició i orientació dels grups de trampes per a tal de fer possible el càlcul del transport sedimentari des d'una perspectiva multidireccional. Exemple del grup de trampes al lòbul de deposició del *blowout* situat a Cala Tirant (Menorca).

En total s'han disposat 3 grups de trampes – cada grup amb 4 trampes individuals – en cada un dels experiments duts a terme. La localització d'aquestes s'ha donat a partir, principalment, de criteris geomorfològics, i no ha distat notablement des



d'una zona d'estudi a l'altra. Tal i com mostra la Figura 60, en ambdós casos es localitza un primer grup de trampes (TA) a la part superior de la platja alta, un darrer grup a la part més interior del *blowout*, coincidint en la zona deposicional (TC). Si bé en els dos grups esmentats no hi ha diferències entre els zones d'estudi, el segon grup de trampes (TB) difereix d'un lloc a l'altre. En el cas d'es Comú de Muro aquest es troba dintre de la cubeta de deflació, coincidint també amb la part posterior de la primera línia de formacions arenoses embrionàries (Figura 60A). No obstant, en el cas de Cala Tirant aquest segon grup es troba just abans de la boca del *blowout* –*throat*– (Figura 60B).



**Figura 60:** Disposició i localització dels grups de trampes verticals de sediment desplegats en les campanyes realitzades al *blowout* d'es Comú de Muro (A) i Cala Tirant (B).

Pel que fa a la recollida de mostres, cada grup de trampes es posa en funcionament al llarg de 20 min cada hora. Així, en una fitxa de camp (Taula 9) s'identifica l'hora i minut en el que una trampa comença a funcionar – corresponent al moment en que es posa la bossa de mostreig en el seu interior –, i l'hora i minut en que aquesta es retira (+ 20 min). Així, queda identificada la trampa en qüestió, a quin grup pertany, i el temps que ha estat captant sediment. Un cop aquesta acaba de funcionar, n'és retirada la bossa de mostreig, la qual s'identifica amb el grup de trampa, orientació i moment de mostreig (Figura 61).

Lloc: Es Comú de Muro		Data: 27-28 juny de 2012
TA1		
Grup Trampes	Hora inici:	Hora final:
<b>Nord</b>	08:22	08:42
<b>Sud</b>	08:24	08:44
<b>Est</b>	08:23	08:43
<b>Oest</b>	00:23	08:43
Observacions		
Cap		

**Taula 9:** Exemple de la fitxa de camp utilitzada per a la recollida de les mostres de sediment captades per les trampes en els diferents moments de mostreig.



**Figura 61:** Imatge de la recollida de mostres de sediment captat per les trampes.

Per tal d'optimitzar temps i recursos, en hores a on el vent era mínim i no comportava un transport associat les trapes no es disposaven en funcionament. Així doncs, en el registre total de cada campanya de camp realitzada, aquelles hores sense dades de transport es corresponen en moments en els que la dinàmica eòlica era molt baixa, o simplement nul·la.

#### 2.4.5.2. Tractament de dades

Un cop al laboratori les bosses de mostreig amb sediment captat per les trapes es separen per moments – hores de mostreig – (e.g. TA1, TB1, TC1 / TA2, TB2, TC2, etc.) A continuació s'identifica cada una de les trapes amb el temps en el que van estar funcionant – hora i minut inici i final – (Taula 10). Un cop identificades les mostres aquestes es fiquen durant 2-3 hores dins l'estufa de dessecació (Figura 48, dreta) per a tal d'eliminar el grau d'humitat associat. Finalment cada mostra de sediment és pesada amb la bàscula d'alta precisió (Figura 48, esquerra).

Grup	Orientació	Inici	Final	Sediment (g)	Velocitat (m/s)
<b>TA1</b>	N	8:43	9:03	0.10	4.8
	S	8:44	9:04	0.10	4.6
	E	8:45	9:05	0.16	4.5
	O	8:46	9:06	0.01	4.3
	<b>Mitjana</b>			0.0925	4.5
<b>TB1</b>	N	8:46	9:06	0.01	3.1
	S	8:48	9:08	0.00	2.8
	E	8:49	9:09	0.02	2.7
	O	8:47	9:07	0.00	3.0
	<b>Mitjana</b>			0.0075	2.9
<b>TC1</b>	N	8:51	8:11	4.98	5.0
	S	8:54	8:14	0.11	4.5
	E	8:53	8:13	0.14	4.7
	O	8:55	8:15	2.22	4.5
	<b>Mitjana</b>			1.8625	4.7

**Taula 10:** Exemple del processament de les mostres recollides sobre el transport de sediment associat a cada grup de trapes, en aquest cas pel moment 1 en una campanya a Cala Tirant.

Un cop es tenen les mostres ordenades, identificades i pesades, aquestes es relacionaran amb la velocitat mitjana de vent existent al llarg del temps de mostreig en el que cada una d'elles va estar en funcionament – per tant, la velocitat mitjana del vent al llarg dels 20 min de mostreig – (Taula 10).

Finalment, per a calcular el transport de sediment associat a cada trampa per a cada un dels moments de mostreig es segueix l'índex aplicat per Cabrera i Alonso (2010) basat en;

$$Q_{\text{trap}} = [St / d * Ts] / 1000$$

a on  $St$  és el sediment captat per cada trampa (g),  $d$  és la longitud d'obertura de captació de la trampa (expressat en mm), i  $Ts$  és el temps de mostreig. Totes les dades referides a transport de sediment són expressades en  $\text{kg m}^{-1} \text{min}^{-1}$ .

Els moments de mostreig en cada una de les campanyes, com ja ha estat mencionat anteriorment, dependrà del número de mostres preses, que alhora aquestes es veuen condicionades per la dinàmica eòlica existent. Així, el número de moments de mostreig – *runs* – per cada campanya queda expressat a la Taula 11.

<b>Campanya de camp</b>	<b>Nº de moments de mostreig (<i>runs</i>)</b>
Es Comú_juny 2012	10
Cala Tirant_setembre 2012	12
Cala Tirant_gener 2013	13

**Taula 11:** Relació entre les campanyes de camp realitzades i el número de mostres de sediment preses.

## 2.5. CFD (Computational Fluid Dynamics)

Les simulacions i modelitzacions del flux eòlic en el *blowout* analitzat al sistema dunar de Tirant (desenvolupades al Capítol 5) han estat dutes a terme a partir del software lliure OpenFoam a través de la utilització de l'eina CFD (*Computational Fluid Dynamics*). Aquesta tècnica és una de les branques de la mecànica de fluids que utilitza mètodes numèrics i algorismes per a resoldre i analitzar problemes sobre el flux de substàncies o gasos (e.g. vent). A grans trets el mètode consisteix en discretitzar una

regió de l'espai (en el nostre cas serà la morfologia *blowout*) creant el que es coneix com a malla espacial, i dividint-la amb petits volums de control. Després es resolen en cada un d'ells les equacions de conservació discretitzada facilitant així la modelització del flux sobre la superfície en qüestió amb una gran precisió. Tot i ser inicialment una tècnica utilitzada sobretot en el camp de l'enginyeria, estudis recents han aconseguit, amb gran cura, adaptar-la a la modelització del flux eòlic sobre sistemes dunars, i també en concret, sobre morfologies *blowout* (Smyth et al., 2012).

La modelització digital del terreny (DEM) de la morfologia *blowout* analitzada s'ha dut a terme seguint les pautes explicades ja a l'epígraf 2.4.2., i posteriorment processada amb el software Surfer<sup>TM</sup>. La malla espacial (*mesh*) sobre la qual s'han corregut els models compta amb 1.631.179 cel·les. Les mides de la zona computacional són de 75 m x 75 m x 30 m, i aquesta ha estat quadriculada a una mida de cel·la de 0.15 m x 0.15 m en superfície.

Les modelitzacions CFD s'han dut a terme utilitzant el model de turbulència k-Epsilon a través de dues equacions *Re-normalised Group* (RNG). El model RNG k- $\epsilon$ , desenvolupat per Yakhot et al. (1992), està basat amb l'equació de la mitja de Reynolds; *Reynolds-Average Navier-Stokes* (RANS), a on el moviment del flux s'extreu del promig al llarg del temps de simulació. El model de turbulència *k- $\epsilon$*  és un dels més utilitzats dins del camp de la dinàmica de fluids computacional.

El *solver* utilitzat en aquest cas ha estat el PIMPLE, mentre que els models s'han corregut a partir del super-ordinador Colossus (*Colossus high performance computer facility*) de la Flinders University, Austràlia.

	Direcció	Velocitats mitges	Velocitats màximes
<b>Estiu (baixa energia)</b>	340°	1.8 ms <sup>-1</sup>	2.5 ms <sup>-1</sup>
<b>Hivern (alta energia)</b>	295°	4.6 ms <sup>-1</sup>	5.7 ms <sup>-1</sup>

**Taula 12:** Condicions inicials del vent registrades per l'anemòmetre 1 en cada un dels experiments duts a termes al *blowout* de Cala Tirant (Menorca) i utilitzades pels models CFD.

S'han establert dos models diferents, basats també en els dos experiments duts a terme *in situ* al camp. Així doncs, les condicions inicials (*Boundary conditions*) han estat

calculades a partir de les dades registrades per l'anemòmetre 1 al llarg de cada campanya (Taula 12). D'aquesta manera el perfil logarítmic del vent ha estat calculat a través de les entrades registrades per l'esmentat anemòmetre sota les condicions energètiques d'hivern i d'estiu;

$$U(z) = u^*/k \ln(z + z_0 / z_0)$$

a on  $U(z)$  és la velocitat del vent a una altura  $z$ ,  $u^*$  és la velocitat de fricció,  $k$  és la constant de von Karman's (0.4187), i  $z_0$  que és l'altura de la rugositat de la superfície (0.0025).

Pel que fa al cas concret dels models referents al vectors i a la velocitat del flux eòlic dintre de la morfologia *blowout*, les imatges s'han construït amb sondes a 1 m de resolució i a 0.5 m per a sobre de la superfície. Amb el resultat final, la coloració de la superfície representa la velocitat del flux al llarg de la cobertura espacial modelitzada, mentre que les fletxes indiquen sols la seva direcció. A partir d'aquest model inicial, s'han calculat, per ambdues situacions, les següents modelitzacions:

- Modelitzacions dels canals de fluxos principals.
- Model de pressió eòlica.
- Model de turbulència a partir de la TKE (*Turbulent Kinetic Energy*).



# Capítol 3

---

La natura ens ha donat les semilles del coneixement, però no el coneixement  
en sí mateix  
(*Sèneca*)

Caracterització de les formes erosives  
*blowout* en sistemes dunars de  
Mallorca i Menorca





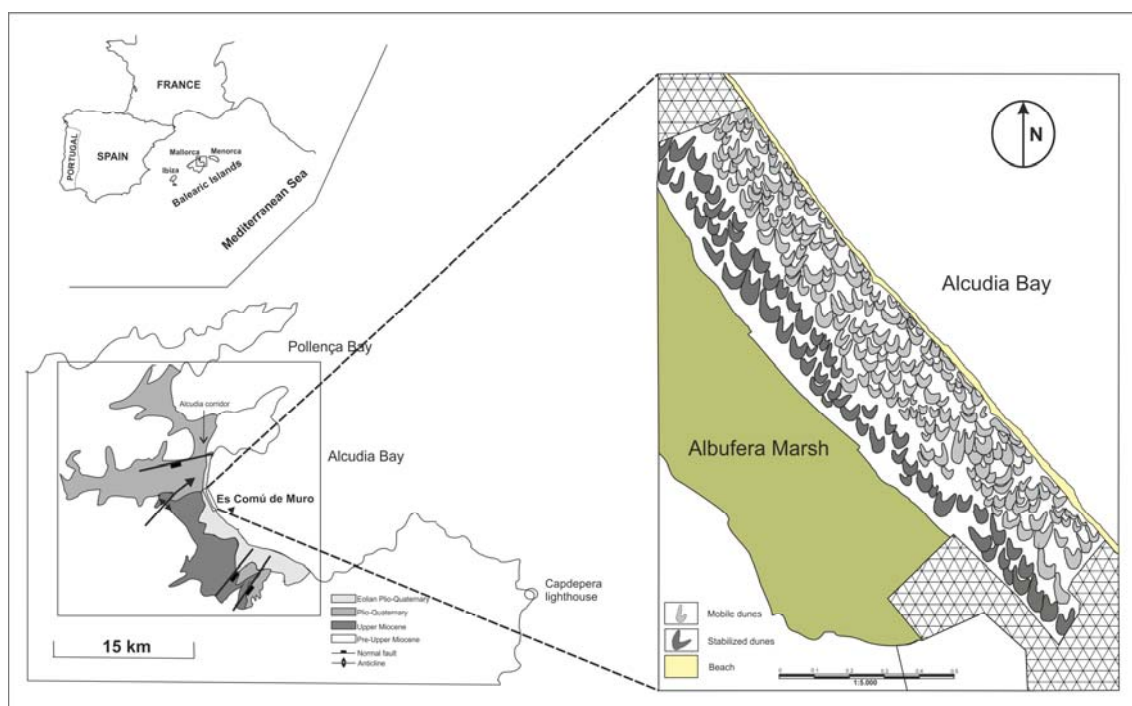
## CAPÍTOL 3\_ CARACTERITZACIÓ DE LES FORMES EROSIVES *BLOWOUT* EN SISTEMES DUNARS DE MALLORCA I MENORCA

### 3.1. Mallorca

#### 3.1.1. Sistema dunar d'es Comú de Muro

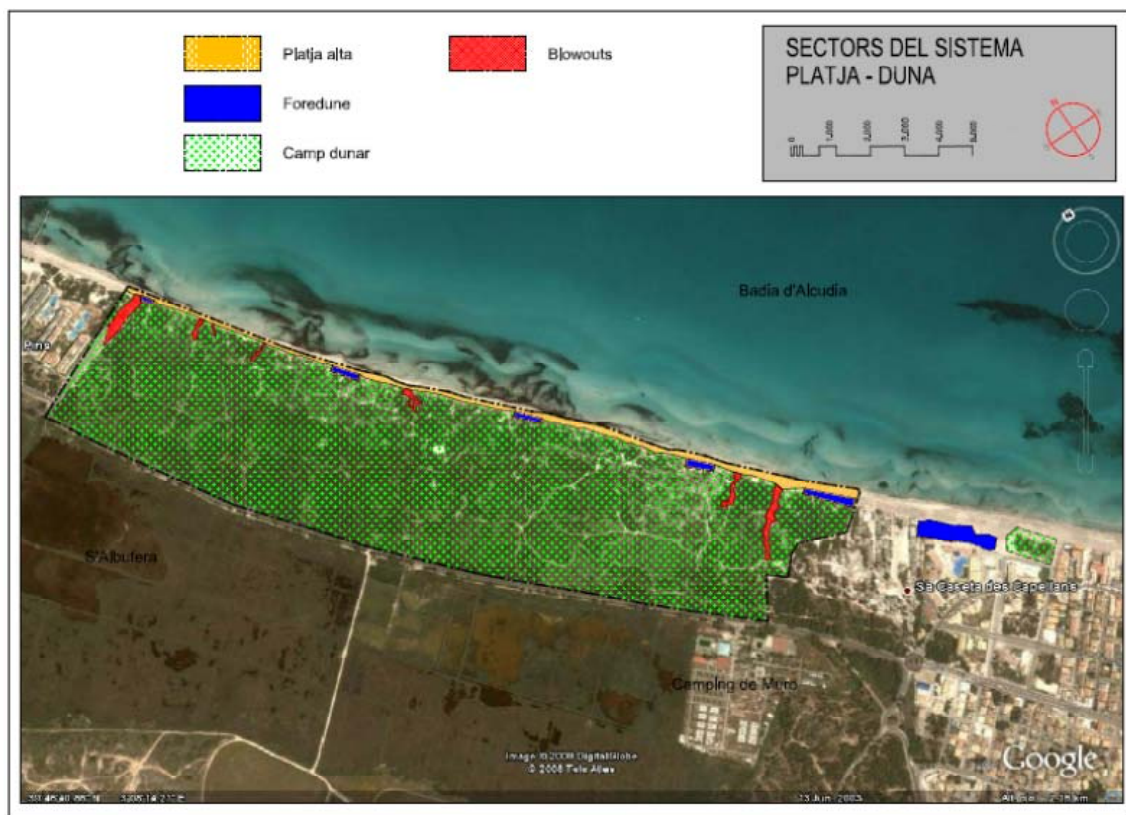
##### 3.1.1.1. Localització i caracterització geogràfica del sistema

El sistema platja-duna d'es Comú de Muro es localitza al quadrant nord-oriental de l'illa de Mallorca, emmarcada dins l'arxipèlag balear, a la Mediterrània occidental (Figura 62). Localitzat a la badia d'Alcúdia, la segona més extensa de Mallorca, després de la de Palma, el sistema dunar es troba dins el municipi de Muro, i des de 1988 quedà dintre dels límits del Parc Natural de s'Albufera de Mallorca. El sistema de dunes existent forma part d'una restinga arenosa formada per la deriva litoral associada – direcció S-N – entre 6.500 i 2.400<sup>14</sup>C anys (Goy et al., 1997). La formació de la restinga arenosa a on posteriorment es desenvolupà el sistema de dunes tanca, en la seva part interior, la zona humida de s'Albufera de la mar.



**Figura 62:** Localització geogràfica del sistema d'es Comú de Muro, i representació esquemàtica de les característiques geològiques limítrofes. Al panell de la dreta es representen les condicions geomorfològiques del sistema dunar, format per dunes parabòliques simples i compostes al llarg d'un front d'uns 1.5 km de longitud (Mir-Gual et al., 2013).

D'acord a l'anàlisi fotomètrica sobre el sistema, avui encara es poden percebre diferents cordons de dunes, seguint els patrons del model de sistemes platja-duna a les Illes Balears (Figura 63). A grans trets, es diferencia clarament la platja emergida de la resta del camp de dunes. Dintre d'aquesta segona unitat cap fer referència principalment al cordó de dunes mòbils o semiestabilitzades, que encara juguen un paper en el control sedimentari del sistema, i en segon lloc, al cordó de dunes estabilitzades. Tal i com es tractarà amb més precisió posteriorment, no s'identifica un cordó de *foredunes* important, i el front de dunes està també alterat per l'existència d'un nombre importants de *blowouts*.



**Figura 63:** Sectorització del sistema platja-duna d'es Comú de Muro (Mallorca). Tot i que al llarg dels darrers decennis aquest sistema ha rebut impactes importants en tant al seu estat de conservació, encara es poden diferenciar distints cordons dunars. No obstant els sectors de *foredune* i dunes mòbils avui en dia presenten un estat de degradació important (Mir-Gual, 2011).

El sistema dunar d'es Comú es localitza en una zona de subsidència, la mateixa que dona lloc a s'Albufera de Mallorca. Tot i que la història evolutiva d'aquesta encara no està del tot aclarida, sembla cert que hi ha hagut un seguit d'episodis de sedimentació que han afectat la seva fisonomia actual. En el seu conjunt, aquests episodis han afavorit, almenys en la part central i oriental de la zona humida, el seu

enfonsament. Aquesta evolució tectosedimentària, junt amb els moviments eustàtics del nivell de la mar, han d'haver donat lloc a formacions de restingues pretèrites amb una localització diferents a l'actual – per exemple les dunes rissianes del promontori de ses Puntes –. Pel que fa a l'actual, tots els factors apunten a un origen Holocè (Servera, 2004).

Obviant la caracterització de la platja alta, el sistema dunar en qüestió es pot dividir en dos sectors principals: a) dunes davanteres, i b) el camp dunar consolidat, distingint alhora les dunes mòbils o semiestabilitzades de les dunes estabilitzades.

#### 3.1.1.1.1. Sector de dunes davanteres

S'hi entenem per *foredunes* les morfologies arenoses que es formen i es desenvolupen a primera línia dunar, en aquest cas se'n fa difícil la seva identificació. La pressió antròpica que ha sofert la platja d'es Comú i el seu adjacent sistema dunar, des de dècades enrere, ha provocat que aquestes formacions hagin minvat considerablement, enredent la seva posició, i no podent-se considerar avui com un sector estructurat. No obstant, la tendència seguida als darrers anys crida a l'esperança, ja que es poden observar petites acumulacions arenoses entorn a exemplars corresponents a vegetació psammòfila, encapçalada pel borró – *Ammophila arenaria* –, i d'altres espècies tals com *Eryngium maritimum*, *Pancratium maritimum*, *Lotus cystisoides*, *Sporobolus pungens*, etc. Aquestes formacions es disposen paral·lelament al front dunar, entre el cordó dissuasori i la primera duna, així com també inserides dins els canals de deflació o *blowouts*, que degut el dinamisme del vent com agent de transport sedimentari, assolixen el comportament propi de primera línia.

Malgrat tot, no es pot afirmar que aquestes formacions conformin una estructura sòlida de *foredunes*, sinó que els exemplars d'*Ammophila arenaria* donen lloc a la formació de *nebkhas* o *shadow dunes* en forma aïllada o lleugerament agrupades (Figura 64). La situació dels *foredunes* d'es Comú ha sofert canvis importants, i que alhora ens serveixen per determinar i definir l'evolució del sistema al llarg del temps. Servera (1997) indica que al 1973 encara existia una línia de *foredunes* contínua, seguint la part superior de la platja alta. No obstant a partir del desenvolupament de la indústria turística i la conseqüent massificació de la platja, l'alteració d'aquesta primera línia dunar ha estat exponencial. Si al pas indiscriminat dels usuaris li sumem les males

pràctiques que al llarg d'anys s'han dut a terme en quant a la neteja de la platja, no és difícil trobar una explicació convincent pel que fa a la situació dels nostres dies.

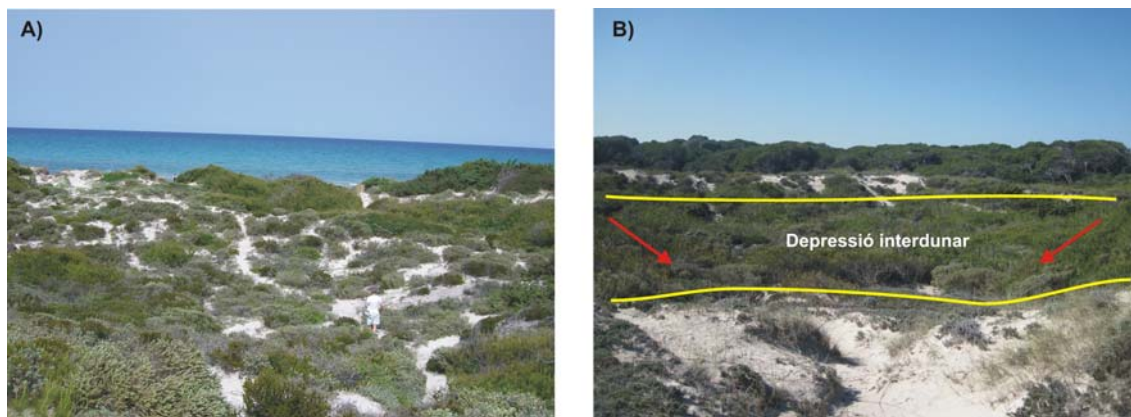


**Figura 64:** Formacions arenoses embrionàries a la primera línia del sistema dunar d'es Comú de Muro (Mallorca) amb presència, principalment, d'*Ammophila arenaria*.

#### 3.1.1.1.2. Sector de dunes mòbils o semiestabilitzades

Segons defineix Servera (1997), el sector de dunes mòbils a es Comú ocupa una franja que oscil·la entre els 200 i 300 metres d'amplària, transcorrent paral·lela a la platja i que va des d'aquesta fins al sector de dunes estabilitzades, de cap a més a l'interior del sistema. Les morfologies mòbils i semiestabilitzades ocupen una superfície que s'aproxima a les 40 hectàrees, organitzant-se en dos cordons. El primer, limítrofe amb la platja alta, actualment presenta un gran nombre de formes erosives tipus *blowouts*, on hi predominen el que es coneixen com a *trough blowout* (Mir-Gual i Pons, 2011). Aquest fet fa que sigui una zona manco vegetada i per tant, més activa des del punt de vista sedimentari (Figura 65A). Amb una regressió important des de la seva part frontal cap a l'interior, aquest queda diferenciat del segon per una sèrie de

depressions interdunars que s'organitzen en línia i de forma paral·lela a la línia de costa (Figura 65B). El segon cordó definit és el més ampli, diferenciat també per la seva major cobertura vegetal, principalment per *Juniperus oxycedrus subs. macrocarpa* i *Pinus halepensis*.



**Figura 65:** a) El primer cordó de dunes mòbils a es Comú de Muro es caracteritza pels signes de fragmentació que presenta, per la presència de formes erosives *blowouts*, i per la degradació de la seva cobertura vegetal, b) Els dos cordons de dunes mòbils es troben separats per una franja deprimida, altament colonitzada per vegetació de tipus arbustiu i llenyós.

Les dunes mòbils a es Comú de Muro presenten morfologies parabòliques, forma que es dona als cossos simples i també a les estructures compostes (Figura 62). La direcció predominant dels seus eixos centrals, al voltant del 59% de les morfologies, és entorn als 180° (Servera, 1997). Aquesta orientació posa de manifest la predominança dels vents que les formen, de component N, molt condicionats pel corredor topogràfic que queda entre el puig de Sant Martí i sa Talaia, al nord del sistema (Servera, 1997; Gelabert *et al.*, 2002; Servera *et al.*, 2009). Les dimensions que les dunes mòbils ocupen en planta en aquest sistema són d'unes 40 ha. Les formacions compostes definides són de tipus rampí – *en-echelon* – a la part més propera de la platja, i superposades – *superimposed* – i digitades – *digitate* – més a l'interior. En menor mesura també es pot observar alguna agrupació del tipus niu – *nested* –. Les formes individuals o simples mostren una estructura amb cares d'*stoss* amb pendents suaus i cares de *lee* amb pendents d'equilibri força més remarcats. Les seves dimensions oscil·len entre els 3 i 10 metres a les seves parts afavorides.

Tal i com es desenvoluparà amb més precisió i extensió al llarg del present capítol, el primer cordó presenta un gran nombre de *blowouts* que es disposen perpendicularment a la línia de costa. A part de les formes individuals, al llarg del front dunar es troben algunes zones degradades, que amb un alt grau de desestabilització, la

seva caracterització es fa difícil. En casos com aquests no seria precís parlar de *blowouts* com a plataformes d'erosió individuals, sinó que seria més eficient considerar aquests indrets com a estructures de *blowouts* interconnectades (Mir-Gual i Pons, 2011) (Figura 66).



**Figura 66:** Mostra de l'alt grau de fragmentació en algunes zones del primer cordó de dunes mòbils. Per a millorar-ne l'estat la imatge mostra algunes de les mesures de gestió aplicades a la zona tals com repoblació artificial de *Juniperus oxycedrus* subs. *Macrocarpa* o la instal·lació de cordó dissuasiu en la part davantera.

#### 3.1.1.1.3. Sector de dunes estabilitzades

Aquest es correspon amb la franja més interna del sistema, avui interferida per la carretera Alcúdia-Artà (Ma-12), impedit la seva connexió natural amb la zona humida, situada a la seva part posterior. Aquestes morfologies es relacionen amb la primera pulsació de l'Holocè, i a l'actualitat el seu dinamisme és inexistent degut a que es troben plenament fixades i estabilitzades per un pinar – *Pinus halepensis* – (Figura 67). Aquest sector està format per dunes que tenen una superfície en planta d'unes 30 ha, amb unes característiques morfològiques semblants a les del sector més mòbil. En aquest cas, les tipologies de dunes compostes s'associen principalment al tipus superposat – *superimpose* –, digitades – *digitate* –, i en rampí – *en-echelon* –. Tot i la cobertura

vegetal, avui encara es perceben sense gaire dificultat les morfologies ben definides, mantenint diferenciades la cara de sobrevent – *stoss* – de la de sotavent – *lee* – (Servera, 1997).



**Figura 67:** Imatge del interior del sistema dunar consolidat, amb reforestació de *P.halepensis*.

Les diferències entre aquest cordó i els dos descrits anteriorment són atribuïbles als canvis respecte al dinamisme que es dona en cada un dels subsistemes. En aquest cas la influència d'agents tals com el vent o les onades n'és, en molts casos, inapreciable pel que fa a la modificació de les seves morfologies.

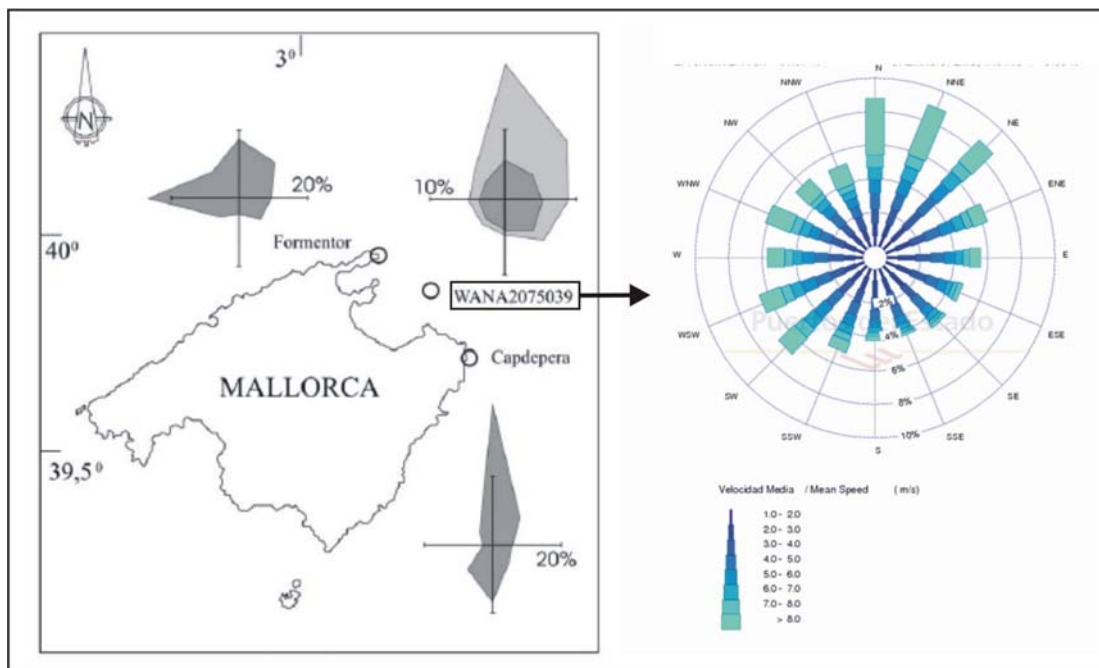
No obstant, aquest, a l'igual que els dos anteriorment descrits, també esdevé un sector amb una pressió antròpica important. La pressió de l'home sobre aquest indret comença cap al segle XIII, amb la reconquesta de Mallorca i la proliferació de les terres comunals, les quals van comportar una explotació cinegètica de la zona molt important, endemés de diferents repoblacions per a tal d'incrementar-ne els recursos vers la població local. Aquesta tendència, tot i que també en part causada per incendis, es mostra avui per la clara diferenciació entre diferents estrats arboris – en alçada i diàmetre de tronc –, així com amb la presència de zones encara desforestades (Mir-Gual, et al., 2010). Més a l'actualitat, aquesta zona ha estat un emplaçament paradigmàtic pel que fa a les activitats d'oci i esbarjo, les quals també van incrementar



el grau de fragmentació i degeneració dels valors geomorfològics i ecològics originaris (zona de càmping, obertura de camins, compactació del sòl, eliminació del sotabosc, etc.).

#### 3.1.1.1.4. Caracterització climàtica

Els vents predominants incidents sobre la franja litoral d'es Comú de Muro són de component N i NE (Figura 68). Tot i que el sector septentrional de la badia d'Alcúdia – a on es localitza el sistema d'es Comú – es troba aparentment protegit dels vents de tramuntana – de component N –, l'existència d'un corredor N-S a la península d'Alcúdia (Figura 62) permet la canalització d'aquests, havent de considerar-los també com a efectius vers al desenvolupament i comportament del sistema dunar d'es Comú de Muro.



**Figura 68:** Representació gràfica dels vents predominants a la badia d'Alcúdia. A la imatge esquerra la predominància dels vents registrats pels far de Formentor i Capdepera, i per la boia WANA2075039 segons Servera et al. (2009). A la dreta la rosa de vents de la boia WANA2075039 entre el període 1996-2013 ([www.puertos.es](http://www.puertos.es)).

Es tracta, a l'igual que a la resta de la Mediterrània occidental, un mar amb un règim micromareal, amb un rang de marea  $< 0.25$  m. Segons els registres en el període 1996-2013 el 70% de l'onatge ha estat de baixa intensitat, amb ones  $< 1$  m, amb un període de recurrència de entre 4-7 s. En tant a l'onatge significant, expressat

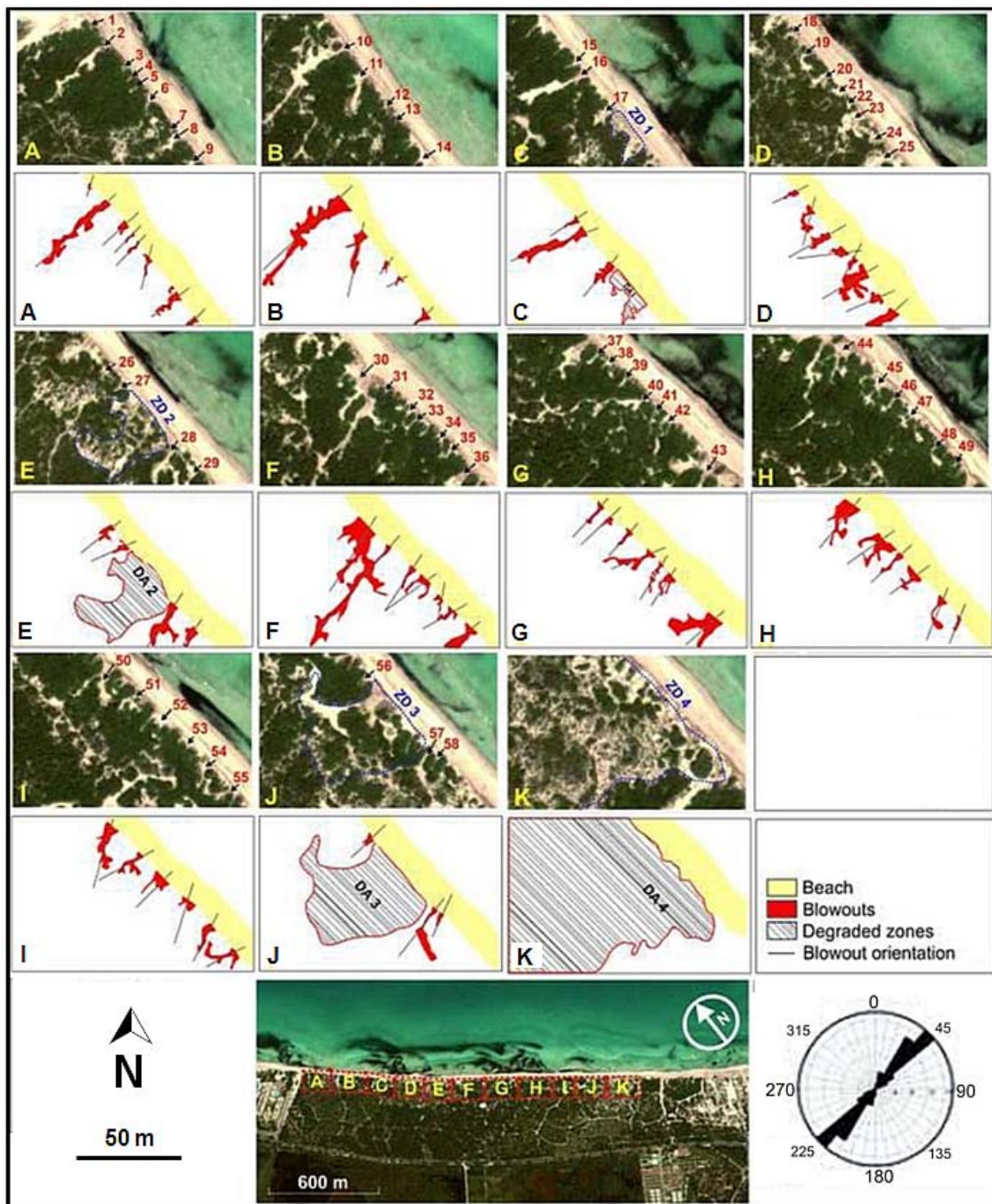
amb ones  $> 3$  m, tan sols es manifesta en un 3% dels dies anuals, experimentant considerables diferències entre les temporades de calma – estiu i primavera – i les més actives – hivern – (Basterretxea et al., 2007).

### 3.1.1.2. Les morfologies *blowout* al sistema d'es Comú de Muro. Resultats

El sistema dunar d'es Comú de Muro esdevé avui altament fragmentat al llarg del seu front de duna, principalment degut a l'alta presència de morfologies erosives tipus *blowout*. Al llarg d'un front aproximat als 1.5 km de longitud s'hi localitzen un total de 58 *blowouts* (Figura 69).

La major densitat de morfologies *blowout* es troba a la seva part més meridional, mentre que la septentrional presenta una menor densitat. En termes general, la relació entre la longitud del front i el número de *blowouts* identificats expressa una densitat de 0.04 *blowout*/m (o 1 *blowout* cada 26 m). Tot i que les dimensions de les morfologies identificades són variables, d'entre el total en destaquen alguns a conseqüència de la seva mida, e.g. BOC2, BOC10, BOC16 o BOC30, els quals representen les majors disruptcions identificades al primer cordó de dunes (Figura 69).

Endemés de les morfologies erosives simples, sembla a ser que el màxim grau de fragmentació i erosió en aquest ambient es localitza en el que són anomenades zones degradades – ZD – (Figura 69), caracteritzades pels importants processos de degradació soferts, expressats per un alt grau de fragmentació geomorfològica, i una degradació important de les seves condicions ecològiques originàries – e.g. degradació i desaparició de la cobertura vegetal associada – (veure més extensament a l'epígraf 3.1.1.2.4.).



**Figura 69:** Localització de les 58 morfologies *blowout* i les 4 zones degradades a n'es Comú de Muro. Deguda a la seva extensió es divideix el front en un total d'11 sectors (A, B, C, D, E, F, G, H, I, J, K) (Mir-Gual et al., 2013).

### 3.1.1.2.1. Dimensió i gradients de pendents dels blowouts analitzats

Les dades referides a la longitud, desnivell i pendent dels 58 *blowouts* analitzats al front dunar d'es Comú de Muro es mostren a la Taula 13. La longitud mitjana de les morfologies en aquest cas és de 18.6 m. La màxima longitud la trobem al BOC10 amb 62.81 m, el qual coincideix també amb un dels accessos històricament més importants a la platja des de l'interior del sistema dunar. No obstant, avui dia ja es troba tancat al pas dels usuaris. Pel que fa al desnivell presentat, el valor mitjà es troba en 2.65 m. El màxim valor es localitza al BOC3, amb 4.01 m, mentre que el mínim el trobem al BOC10, amb tan sols 0.03 m, dibuixant doncs una superfície notablement plana. Finalment, la pendent mitjana de les morfologies analitzades en aquest sistema es situa en el 18.6%. La màxima pendent es troba associada al BOC4, amb un 41.71%, mentre que la mínima es localitza al BOC 10, només amb el 0.03%.

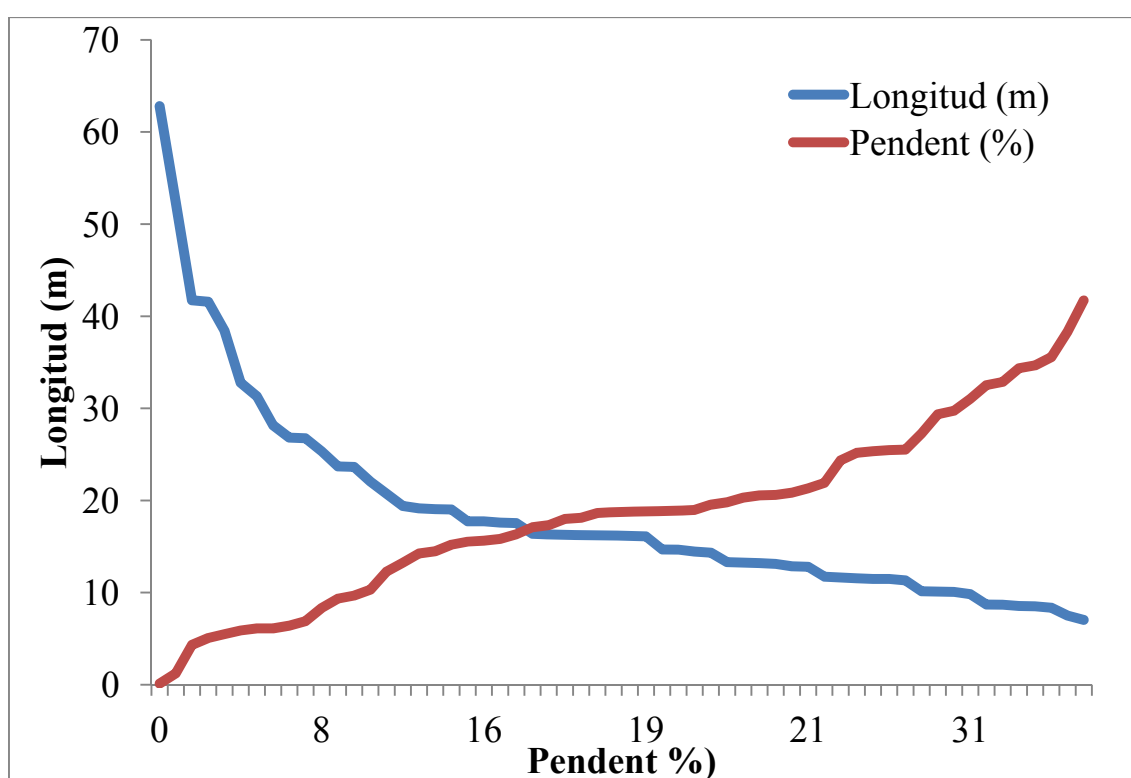
La perspectiva dimensional de les dades obtingudes mostrea que, en general, el pendent dels *blowouts* decreix a mesura que la seva longitud incrementa. En aquest sentit, el cas més representatiu queda manifestat en el BOC10, el qual té una longitud de quasi 63 m i una pendent sols del 0.13%. Altres exemples representatius en són el BOC17, que amb una longitud de 52.36 m té un pendent del 4.43%, o el BOC43, amb total de 41.73 m i un pendent del 5.9% (Taula 13).

	<b>Longitud (m)</b>	<b>Desnivell (m)</b>	<b>Pendent (%)</b>
BOC1	8,70	1,70	19,54
BOC2	26,75	2,76	10,32
BOC3	9,84	3,50	35,57
BOC4	8,35	3,20	38,32
BOC5	8,68	3,62	41,71
BOC6	16,11	3,32	20,61
BOC7	14,68	2,75	18,73
BOC8	13,25	2,47	18,64
BOC9	11,64	2,55	21,91
BOC10	62,81	0,08	0,13
BOC11	41,57	0,51	1,23
BOC12	7,04	2,44	34,66
BOC13	11,48	2,91	25,35
BOC14	7,51	2,58	34,35
BOC15	22,05	3,97	18,00
BOC16	11,48	3,37	29,36
BOC17	52,36	2,27	4,34
BOC18	16,28	2,53	15,54
BOC19	17,74	2,18	12,29
BOC20	12,80	3,26	25,47
BOC21	32,78	1,80	5,49
BOC22	13,30	2,08	15,64
BOC23	11,73	2,41	20,55
BOC24	23,69	1,45	6,12
BOC25	16,38	0,83	5,07
BOC26	38,45	2,65	6,89
BOC27	10,11	2,58	25,52
BOC28	13,12	2,47	18,83
BOC29	8,55	2,78	32,51
BOC30	16,23	2,65	16,33
BOC31	16,32	2,16	13,24
BOC32	11,33	3,37	29,74
BOC33	14,45	3,08	21,31
BOC34	26,83	1,64	6,11
BOC35	17,60	3,34	18,98
BOC36	11,56	2,91	25,17
BOC37	10,08	2,75	27,28
BOC38	13,20	2,49	18,86
BOC39	19,41	1,62	8,35
BOC40	10,14	2,47	24,36
BOC41	8,52	2,80	32,86
BOC42	17,73	2,57	14,50
BOC43	41,73	2,46	5,90
BOC44	23,65	2,21	9,34
BOC45	19,03	3,59	18,86
BOC46	19,05	3,97	20,84
BOC47	28,16	4,01	14,24
BOC48	31,31	2,01	6,42
BOC49	16,23	2,81	17,31
BOC50	14,34	2,84	19,80
BOC51	20,72	3,15	15,20
BOC52	19,14	3,59	18,76
BOC53	12,86	3,99	31,03
BOC54	25,33	2,45	9,67
BOC55	17,54	3,00	17,10
BOC56	16,17	2,93	18,12
BOC57	14,67	2,98	20,31
BOC58	16,17	2,56	15,83
<b>Mitjana</b>	<b>18,60</b>	<b>2,65</b>	<b>18,60</b>

**Taula 13:** Pendent, longitud (m) i desnivell (%) per a cada una de les morfologies blowout analitzades a es Comú de Muro.

La situació contrària reverteix doncs en que els *blowouts* amb menor longitud es veuen caracteritzats normalment per pendents més pronunciades. Aquest fet pot ser percebut, per exemple, al BOC12, que amb una longitud de tan sols 4.7 m presenta un pendent del 34.66%, o bé en *blowouts* com els BOC14, BOC29 i BOC41, que movent-se en una mitja als voltant dels 8 m presenten un pendent mitjà del 33% (Taula 13).

En tant a la correlació existent entre les variables analitzades, si s'aplica l'índex de *Pearson*, s'observa com la correlació entre longitud i desnivell és pobra, expressada amb  $r = -0.46$ . No obstant aquesta incrementa si correlacionem longitud i pendent, expressant-se en  $r = -0.78$ .



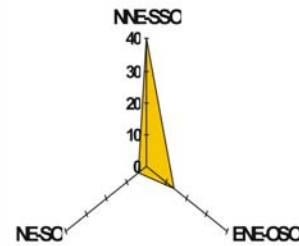
**Figura 70:** Gràfic de correlació entre la longitud i la pendent dels 58 *blowouts* caracteritzats a n'es Comú de Muro.

Les correlacions abans esmentades queden en certa manera reflectides a la Figura 70. Així es veu que a mesura que incrementa la longitud dels *blowouts* el seu pendent disminueix, mentre que en el cas contrari, sota pendents més elevades hi trobem longituds menors. Si es consideren cada una de les variables com a grups independents hi ha una alta homogeneïtzació pel que fa al desnivell, en un rang que oscil·la sols entre els 4.01 m i els 0.08 m (Taula 13). No obstant, les variables de longitud i desnivell mostren una major heterogeneïtat.

3.1.1.2.2. Orientació dels *blowouts*

El front dunar d'es Comú de Muro, així com en tota la seva integritat, està principalment sotmès als vents predominants de NE, i en segon lloc als de component N (Figura 68). Com a conseqüència, i també a partir de les implicacions que hi juguen les característiques geomorfològiques i estructurals de la badia d'Alcúdia, l'orientació principal de les morfologies *blowout* existent en la primera línia de duna és de NNE-SSO, seguida de ENE-OSO (Taula 14).

BO	Graus	Direcció	BO	Graus	Direcció	BO	Graus	Direcció
1	8	NNE-SSO	26	49	ENE-OSO	51	65	ENE-OSO
2	45	NE-SO	27	69	ENE-OSO	52	32	NNE-SSO
3	38	NNE-SSO	28	38	NNE-SSO	53	44	NNE-SSO
4	43	NNE-SSO	29	31	NNE-SSO	54	20	NNE-SSO
5	41	NNE-SSO	30	34	NNE-SSO	55	42	NNE-SSO
6	16	NNE-SSO	31	30	NNE-SSO	56	47	ENE-OSO
7	37	NNE-SSO	32	32	NNE-SSO	57	36	NNE-SSO
8	48	ENE-OSO	33	45	NE-SO	58	34	NNE-SSO
9	41	NNE-SSO	34	13	NNE-SSO			
10	65	ENE-OSO	35	28	NNE-SSO			
11	19	NNE-SSO	36	45	NE-SO			
12	44	NNE-SSO	37	42	NNE-SSO			
13	56	ENE-OSO	38	46	ENE-OSO			
14	37	NNE-SSO	39	34	NNE-SSO			
15	44	NNE-SSO	40	41	NNE-SSO			
16	60	ENE-OSO	41	38	NNE-SSO			
17	41	NNE-SSO	42	40	NNE-SSO			
18	50	ENE-OSO	43	25	NNE-SSO			
19	21	NNE-SSO	44	17	NNE-SSO			
20	52	ENE-OSO	45	25	NNE-SSO			
21	45	NE-SO	46	41	NNE-SSO			
22	31	NNE-SSO	47	36	NNE-SSO			
23	47	ENE-OSO	48	39	NNE-SSO			
24	57	ENE-OSO	49	34	NNE-SSO			
25	51	ENE-OSO	50	6	NNE-SSO			



**Taula 14:** Orientació (expressada en °) de les 58 morfologies *blowout* analitzades al sistema d'es Comú de Muro (Mallorca). Aquesta taula es relaciona amb la informació gràfica mostrada per la Figura 69.

En termes quantitius 40 dels 58 *blowouts* analitzats es disposen en una orientació NNE-SSO, representant així el 68.97 % del total, 14 presenten una orientació ENE-OSO (suposant el 24.14%), i només 4 són els que es disposen NE-SW, suposant el 6.9%. Si l'anàlisi es fa en termes acumulatius cal dir que les dues principals direccions – NNE-SSO i ENE-OSO – acumulen el 93.1 % sobre la mostra total. Finalment, si es considera la mitjana numèrica de graus d'obertura dels *blowouts*, expressada amb 38.53°, aquesta és correspon notablement a la obertura NNE de la pròpia badia d'Alcúdia, suggerint doncs que el control estructura també és un condicionant a tenir en

compte. A la Figura 69 es reflecteix gràficament cada una de les orientacions mostrades per les morfologies analitzades al llarg de tot el front de duna d'es Comú.

### 3.1.1.2.3. Morfometria i topografia interna

S'han aixecat perfils topogràfics interns en cada una de les 58 morfologies *blowout* identificades al front de dunes d'es Comú de Muro. No obstant, les mesures en relació a les 4 zones degradades (Figura 69) han estat descartades degut al seu alt grau de fragmentació. Com a conseqüència de la seva complexitat geomorfològica actual aquestes no poden ser tractades de la mateixa manera que les morfologies simples. Respecte a la resta de dades es perceben diferències rellevants pel que fa a la topografia mostrada pels diferents perfils transversals aixecats al llarg de les morfologies simples.

Perfils topogràfics transversals (m)											
	T1	T2	T3	T4	T5		T1	T2	T3	T4	T5
BOC1	1,60	1,99	\	\	\	BOC31	2,55	1,92	1,85	\	\
BOC2	5,20	4,25	3,44	\	\	BOC32	3,92	2,52	1,87	\	\
BOC3	1,75	1,76	0,98	\	\	BOC33	5,53	4,12	2,73	\	\
BOC4	2,67	1,52	\	\	\	BOC34	6,01	5,40	13,35	\	\
BOC5	1,44	1,91	\	\	\	BOC35	3,10	2,57	1,98	\	\
BOC6	4,64	1,91	1,96	\	\	BOC36	4,32	2,04	1,36	\	\
BOC7	4,38	5,10	2,44	\	\	BOC37	3,11	1,30	\	\	\
BOC8	4,01	3,73	1,29	\	\	BOC38	3,28	2,08	2,84	\	\
BOC9	5,02	4,08	\	\	\	BOC39	2,75	4,73	1,83	\	\
BOC10	4,79	3,39	5,40	4,45	\	BOC40	2,29	1,30	\	\	\
BOC11	8,39	5,01	14,73	\	\	BOC41	3,11	1,80	1,88	\	\
BOC12	1,93	1,16	\	\	\	BOC42	2,55	2,30	1,47	\	\
BOC13	6,14	2,65	1,73	\	\	BOC43	15,91	5,44	3,52	2,88	\
BOC14	2,14	2,18	\	\	\	BOC44	14,47	1,88	2,06	1,94	\
BOC15	3,51	2,09	\	\	\	BOC45	2,65	2,17	2,41	\	\
BOC16	3,86	3,33	1,45	\	\	BOC46	14,06	2,19	1,91	1,78	\
BOC17	4,92	2,61	7,3	1,91	5,92	BOC47	4,06	2,16	2,96	\	\
BOC18	3,42	2,89	3,42	\	\	BOC48	12,70	5,82	8,68	\	\
BOC19	12,66	4,57	2,39	\	\	BOC49	2,16	1,94	1,42	\	\
BOC20	3,83	4,03	4,05	\	\	BOC50	2,53	1,54	1,80	\	\
BOC21	10,99	7,01	5,95	\	\	BOC51	3,54	2,25	1,42	\	\
BOC22	3,98	1,61	1,95	\	\	BOC52	4,28	2,72	2,06	\	\
BOC23	4,32	2,47	1,26	\	\	BOC53	2,54	1,40	\	\	\
BOC24	8,51	2,77	5,97	\	\	BOC54	6,86	2,95	1,63	\	\
BOC25	3,81	1,98	3,46	\	\	BOC55	5,01	2,61	2,78	\	\
BOC26	9,71	3,97	5,30	4,84	\	BOC56	2,95	2,09	4,92	\	\
BOC27	2,68	1,68	2,30	\	\	BOC57	2,80	1,79	\	\	\
BOC28	4,20	2,21	5,59	\	\	BOC58	2,33	1,94	\	\	\
BOC29	3,29	1,47	\	\	\						
BOC30	5,34	2,90	1,33	\	\	<b>Mitjana</b>	4,77	2,94	3,80	3,73	5,92

**Taula 15:** Amplada de cada un dels perfils topogràfics transversals aixecats en els *blowouts* d'es Comú de Muro. En vermell apareixen els valors màxims, i en blau ho fan els valors mínims identificats.



En termes generals l'amplada de les morfologies disminueix des de la seva boca cap a la seva part més interna. Aquesta tendència queda reflectida si es consideren els valors mitjans mostrats per T1= 4.77 m, T2= 2.94, i T3= 3.80 m (Taula 15). El fet de que la mitjana de T3 sigui major a la de T2 es relaciona amb; a) que el nombre de mesures és inferior i, b) que en alguns casos aquesta mesura reflecteix la presència de la zona de deposició sedimentària existent a la part més interna. Això queda reflectit en el cas del BOC11 (Figura 71) a on la l'amplada de T3 (14.73 m) és considerablement major a la mostrada per T1 (8.39 m) i T2 (5.01 m). En termes generals, la màxima amplada en T1 es troba al BOC43, amb 15.91 m, mentre que la mínima es localitza al BOC1, amb sols 1.6 m. En el cas de T2 la màxima, expressada en 7.01 m es troba al BOC21, mentre que la mínima es dona al BOC12 amb 1.16 m. Finalment, la màxima amplada a la secció T3 es situa en els 14.73 m, concretament al BOC11, i la mínima es troba al BOC3, amb 0.98 m (Taula 15).

Descripció	Exemples
<i>Blowouts</i> caracteritzats per dos perfils topogràfics interns	BOC1,5,12,14,15,29,37,40,53,57
<i>Blowouts</i> caracteritzats per cinc perfils topogràfics interns	BOC17
<i>Blowouts</i> amb gran amplada a la seva boca, però decreixent de cap al interior	BOC51,3,30,36,44,46,54
<i>Blowouts</i> amb morfologia còncava a la boca i parets laterals amb pendent fort	BOC4,8,23,32,33,38,39,49,52
<i>Blowouts</i> amb topografia plana i poca concavitat	BOC6,28,31,42
<i>Blowouts</i> amb clares evidències de deposició sedimentària a la seva part central i interior	BOC7,10,34,47,56,57
<i>Blowouts</i> amb presència de terraces en les seves parets laterals per manca de vegetació	BOC9
<i>Blowouts</i> amb lòbul de deposició a la seva part interior	BOC11,18,24,25,27
<i>Blowouts</i> amb poca amplada a la seva boca, i estrets fins al seu interior	BOC13,16,19,22,41
<i>Blowouts</i> morfològicament molt heterogenis, típics de zones degradades	BOC17,26,43,48
<i>Blowouts</i> topogràficament molt homogenis	BOC20,21,35,45,50,55
<i>Blowouts</i> amb solcs de deflació entre T1 i T2	BOC2

**Taula 16:** Categories dels *blowouts* en el sistema d'es Comú de Muro a partir de les seves característiques topogràfiques internes (Mir-Gual et al., 2013).

A pesar de les diferències percebudes entre les diferents seccions, i també del gran nombre de *blowouts* considerats, es fa possible agrupar-los dintre de distints grups a partir de les característiques topogràfiques mostrades (Taula 16, Figures 71 i 72). Així, la topografia mostrada generalment per T1 és plana i homogènia, especialment en la seva part central. Endemés, les seves parets laterals normalment són baixes, presentant pendents suaus. Exemples del dit queden palesos en casos com el BOC6, BOC17 o BOC51 (Figura 72). Una de les altres característiques mostrades per aquesta primera secció és la presència de petits solcs de deflació, sobretot en la seva part central, tal i com mostren els BOC6 o BOC13 (Figura 72 i 71), que en alguns casos s'estenen fins a T2, com mostra el cas de BOC2 (Figura 71).

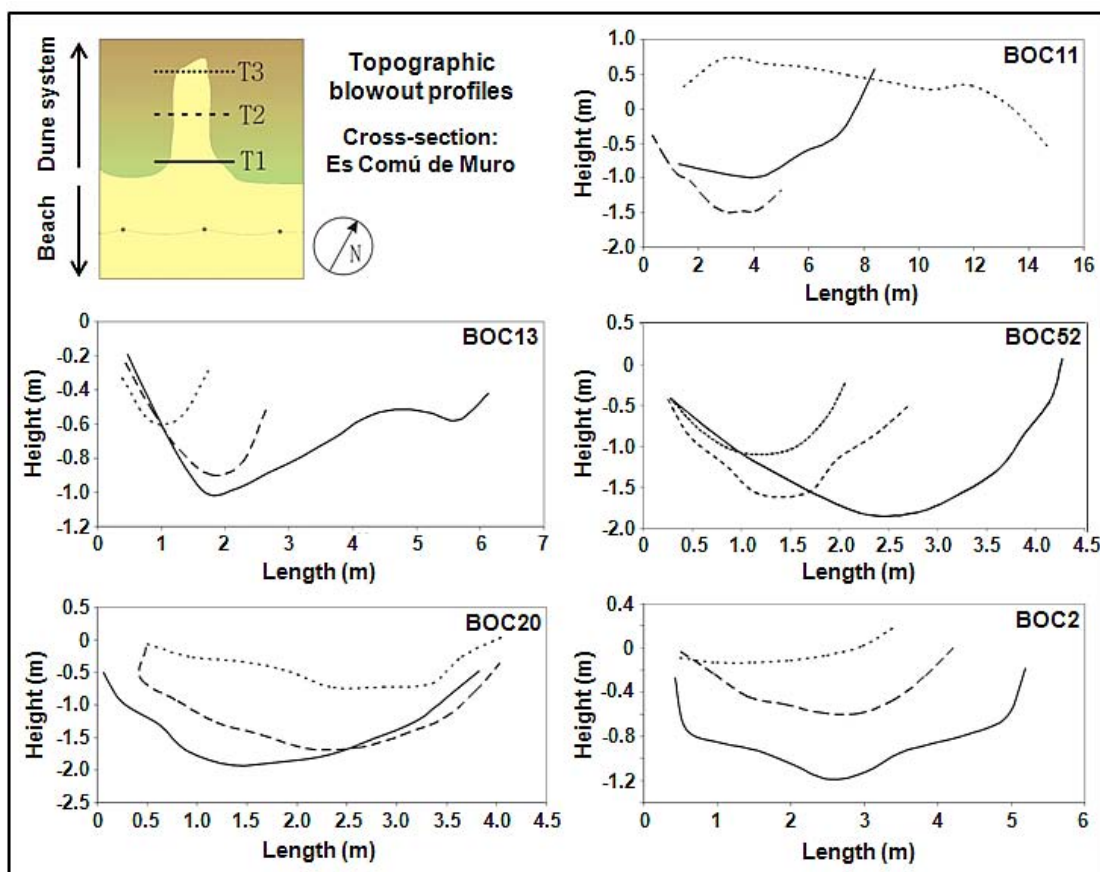


Figura 71: Perfils topogràfics de BOC2, 11, 13, 20 i 52 (Mir-Gual et al., 2013).

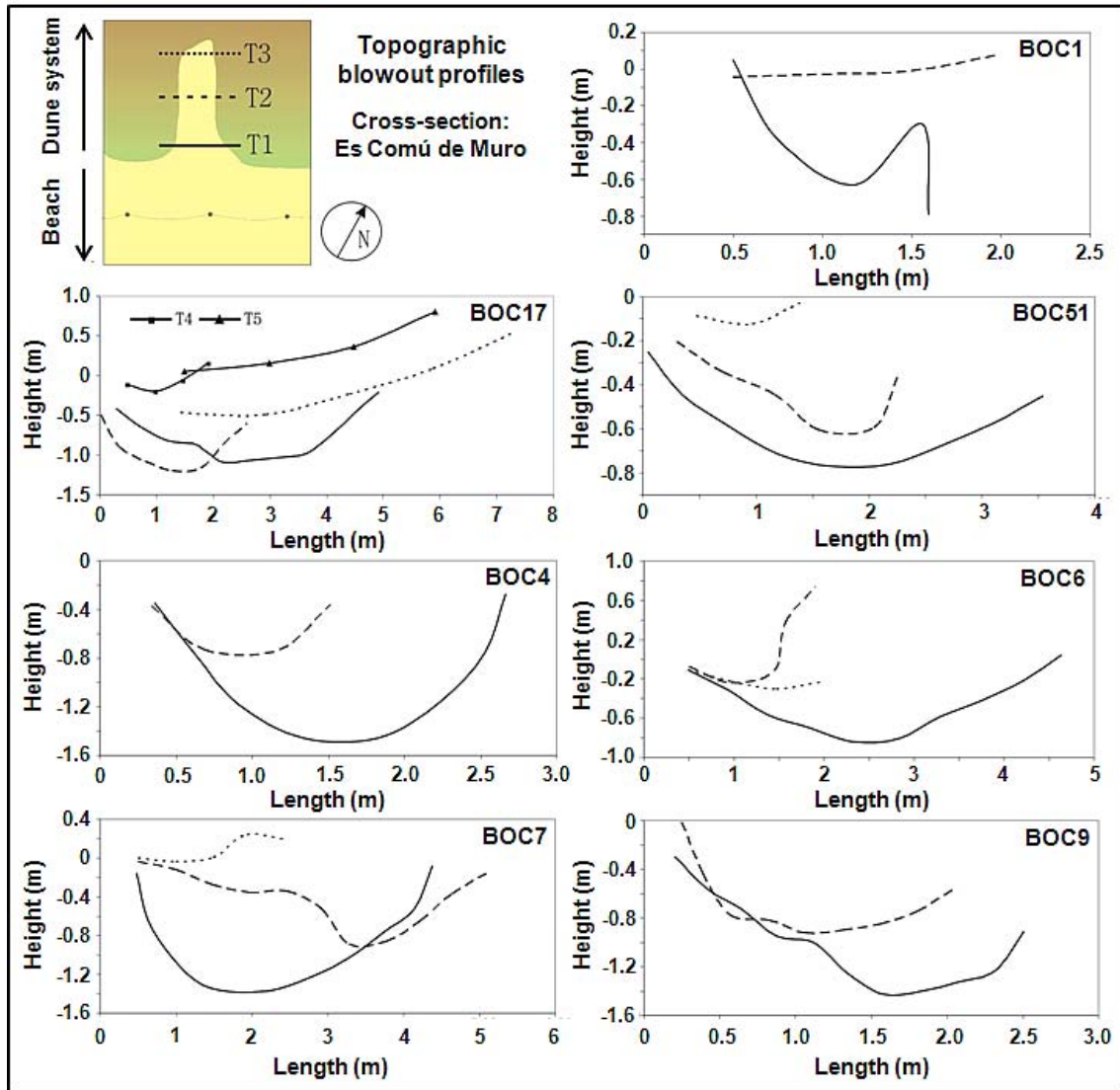


Figura 72: Perfils topogràfics de BOC1, 4, 6, 7, 9, 17 i 51 (Mir-Gual et al., 2013).

#### 3.1.1.2.4. Caracterització i model evolutiu de zones degradades

En el cas d'es Comú de Muro, i a diferència dels altres casos estudiats per a la present tesi, el màxim grau de fragmentació i erosió al front dunar no es dona tant en la gran presència de formes *blowout* simples, sinó en zones altament degradades (ZD) des del punt de vista geomorfològic. Aquestes àrees estan caracteritzades per una complexa estructura de disruptcions dunars i *blowouts* interconnectats entre sí (veure Figura 16 de l'epígraf 1.6.2.). Tal i com ja ha estat esmentat amb anterioritat, un total de 4 ZD han estat identificades al sistema d'es Comú de Muro (Figura 69). ZD1 es caracteritza per una estat notable de degradació pel que fa a la seva cobertura vegetal. Aquesta presenta una estructura tabular, en forma d'altiplà (Figura 73A), que s'estén al llarg d'uns 45 m

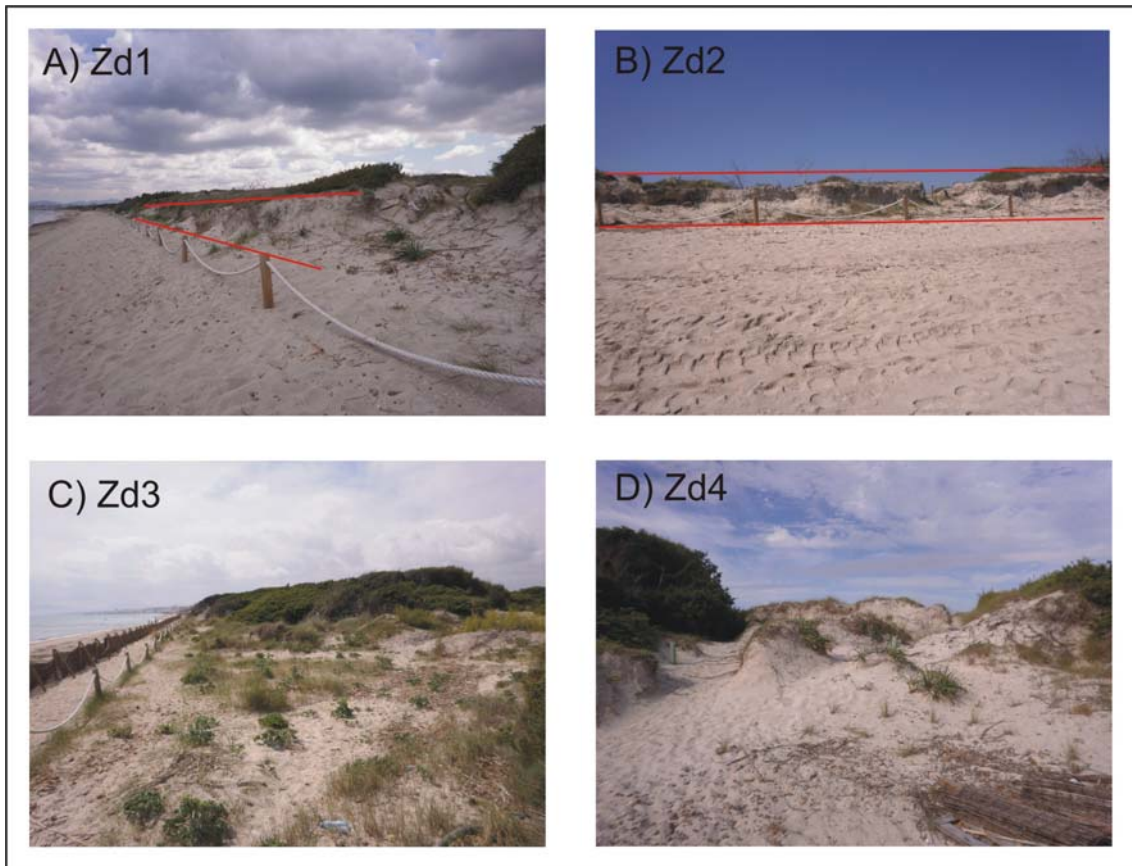
de longitud en el seu front, amb una altura mitjana de 0.6 m. Aquesta àrea es troba delimitada per dos *blowouts* simples en ambdós marges. La vegetació arbustiva i llenyosa és absent al llarg dels primers metres del sistema de dunes consolidades, sent predominant la vegetació de tipus herbaci. A conseqüència de la pressió dels usuaris sobre la part superior de la platja alta, avui és completament inexistent la presència de *foredunes* en primera línia. No obstant s'estan formant de forma incipient algunes morfologies arenoses efímeres associades a la presència de la vegetació herbàcia existent.

ZD2 és caracteritzada també per ser una zona notablement fragmentada, especialment al llarg de la seva primera línia. Com en el cas de ZD1 aquesta presenta també una forma tabular al llarg del seu front (Figura 73B), el qual s'estén en uns 36 m de longitud i presenta una alçada que oscil·la entre els 0.4 - 0.5 m. L'alt grau d'erosió i fragmentació existent es troba directament relacionat amb la manca de vegetació. Aquí, de nou, la vegetació herbàcia és la que domina els primers metres del sistema de dunes, sent-ne la llenyosa pràcticament inexistent. En aquest cas no obstant, la línia de *foredune* es troba millor desenvolupada, amb morfologies arenoses més compactes entre sí, principalment fixades per distints exemplars d'*Ammophila arenaria*.

ZD3 (Figura 73C), a diferència de les dues zones descrites anteriorment, no presenta una estructura tabular, sinó que es caracteritza per un gran nombre de interrupcions – *mossegades* – al llarg del seu front, derivant-ne aquestes amb *blowouts* interconnectats entre sí al llarg de la segona línia de duna. Aquest fet, doncs, suggereix que actualment el front de duna està immers en un retrocés de cap a l'interior del sistema, fet que es percep al llarg dels seus 76 m de front. La conseqüència derivada del patent retrocés n'és que avui es presenta una distància considerable – oscil·lant entre els 3 i 10 m – entre el límit superior de la platja alta i la primera duna. Aquesta situació, junt amb l'acordonament preventiu de la zona, està suposant la proliferació de vegetació herbàcia en les zones més erosionades que alhora, ajuden a la formació de morfologies arenoses no estabilitzades de tipus *echo dunes* o *shadow dunes*. Això fa que la vegetació que hi predomina sigui de característiques herbàcies, en detriment de la vegetació arbustiva, la qual mostra greus signes de conservació.

Finalment, amb un front que s'estén al llarg de 130 m de longitud s'identifica la ZD4 (Figura 73D), esdevenint la major de les 4 zones identificades, al temps de la que presenta el major grau de fragmentació. Aquesta, a l'igual que ZD3 no es caracteritza per una estructura tabular, sinó que es manifesta per un gran nombre de *blowouts* en

primera línia, interconnectats entre sí per la seva part interior. La màxima diferència entre ZD3 i ZD4 és que, en aquest darrer cas, els patrons de fragmentació es projecten més cap a l'interior, fent més complexa la seva caracterització. Els signes de degradació són ja visibles al seu front, destacant la presència de promontoris dunars relictos fruits de l'erosió de les morfologies limítrofes. No obstant, es repeteix el fet de que les zones més erosionades, avui, a conseqüència d'algunes mesures de gestió preses, experimenten una recolonització important de vegetació herbàcia la qual ajuda al naixement de noves morfologies arenoses de tipus embrionari (Figura 73C).



**Figura 73:** Imatge de les 4 zones degradades (ZD) identificades a n'es Comú de Muro. Les dues imatges superiors reflecteixen l'estructura tabular, en forma d'altiplà i amb absència absoluta de vegetació arbustiva. Les dues imatges inferiors presenten una realitat geomorfològica més complexa, caracteritzada pel seu alt grau de fragmentació.

#### 3.1.1.2.5. Classificació morfològica

A la present zona d'estudi és possible diferenciar entre dues tipologies de *blowouts* a partir de la seva forma; *trough blowouts*, els quals suposen el 56.9% sobre la mostra total, i les formes mixtes o *mixed shapes*, les quals combinen elements típics de *trough* i *saucer blowouts*, representant el 43.1% (Figura 74). En aquest cas no es

distingeixen formes de *saucer blowout* simples. No obstant, les formes mixtes estan compostes per una estructura típica de *trough* en la seva boca, mentre que en la seva part interior, relacionant-se amb lòbuls de deposició sedimentària, en molts casos es donen formes circulars, aproximades a les definides pels *saucer blowout* (Figura 74).

Totes les morfologies analitzades parteixen d'estats inicials contemplats per morfologies simples. No obstant, la tendència erosiva seguida al llarg dels anys ha suposat un increment de les seves dimensions, i per tant també, del seu grau de fragmentació. Per aquest fet doncs, s'expliquen els canvis estructurals soferts per cada una de les morfologies. En aquest sentit, i partint de la seva estructura, es diferencien entre morfologies simples, les quals representen el 62-07% del total, i morfologies ramificades o *branched blowouts*, que suposen el 36.21% restant (Figura 74, inferior).

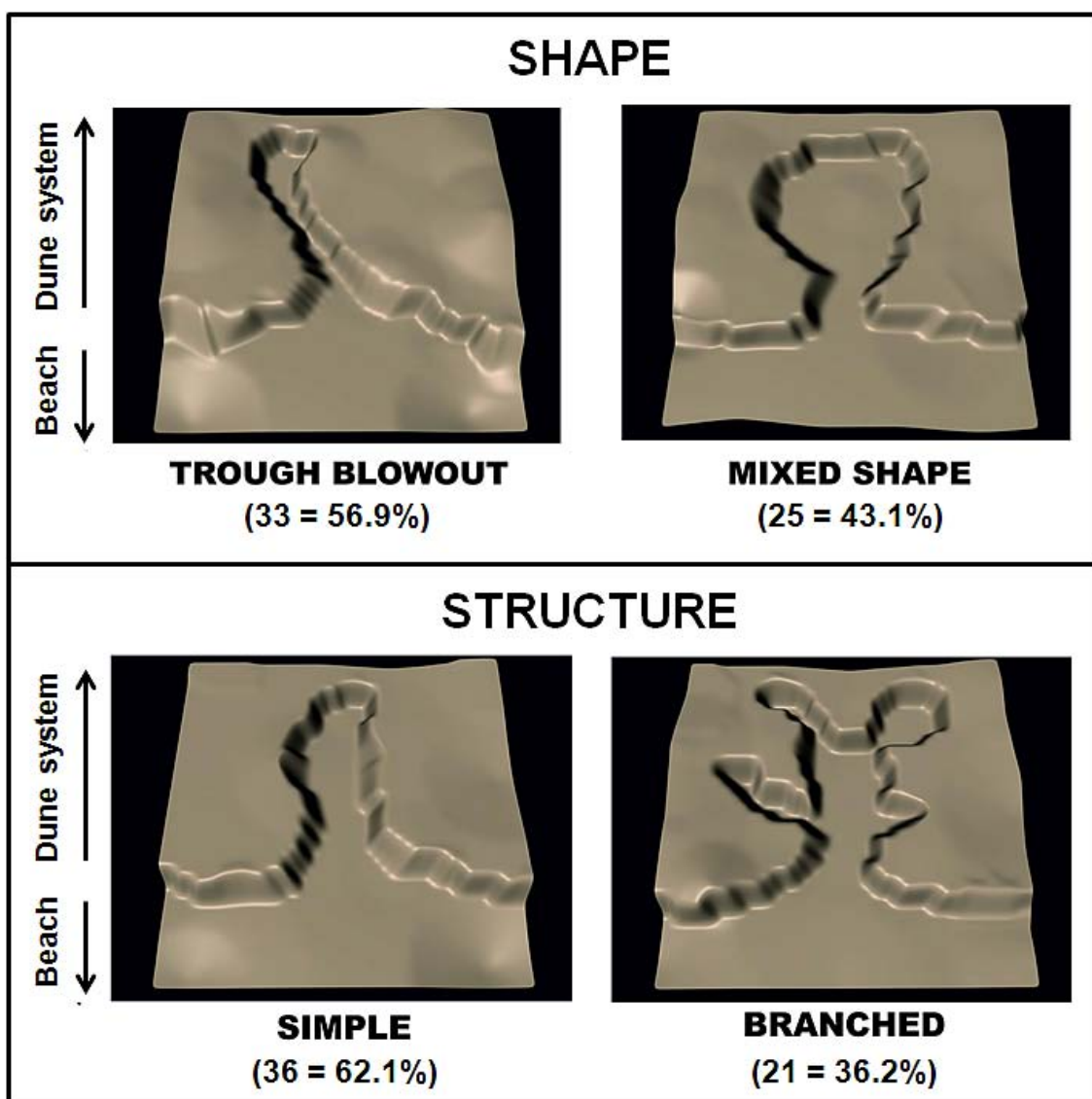
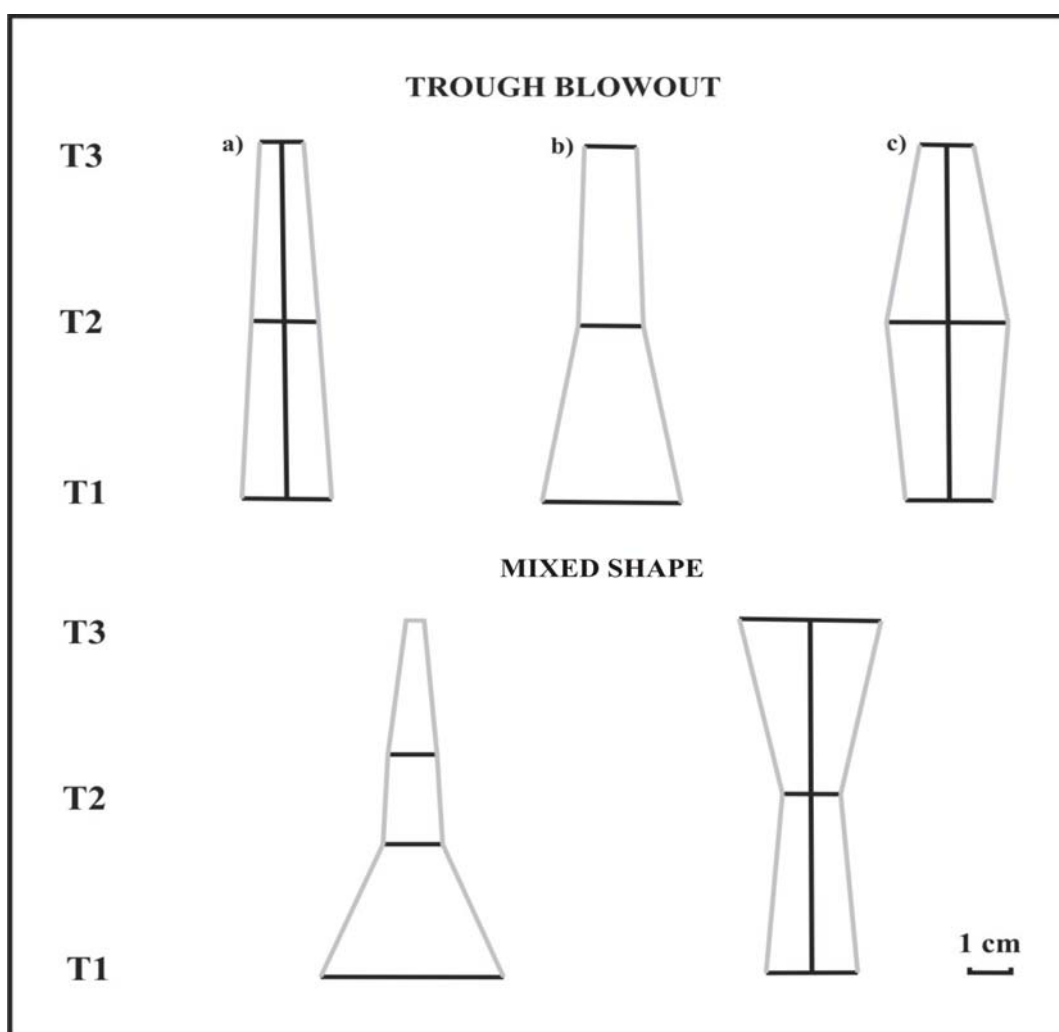


Figura 74: Classificació morfològica de les morfologies *blowout* al sistema d'es Comú de Muro (Mir-Gual et al., 2013).

		$iT_x$	Lenght	$iT1$	$iT2$	$iT3$	$iT4$	$iT5$	$iA$
TROUGH BLOWOUTS	A	BOC1	8,70	0,18	0,23	0	0	0	0
		BOC2	26,75	0,19	0,16	0,13	0	0	
		BOC3	9,84	0,18	0,18	0,10	0	0	
		BOC5	8,68	0,17	0,22	0	0	0	
		BOC8	13,25	0,30	0,28	0,10	0	0	
		BOC9	11,64	0,43	0,35	0	0	0	
		BOC10	62,81	0,08	0,05	0,09	0,07	0	
		BOC12	7,04	0,27	0,16	0	0	0	
		BOC14	7,51	0,28	0,29	0	0	0	
		BOC15	22,05	0,16	0,09	0	0	0	
		BOC16	11,48	0,34	0,29	0,13	0	0	
		BOC17	52,36	0,09	0,05	0,14	0,04	0,11	
		BOC18	16,28	0,21	0,18	0,21	0	0	
		BOC20	12,80	0,30	0,31	0,32	0	0	
		BOC21	32,78	0,34	0,21	0,18	0	0	
		BOC25	16,38	0,23	0,12	0,21	0	0	
		BOC27	10,11	0,27	0,17	0,23	0	0	
		BOC31	16,32	0,16	0,12	0,11	0	0	
		BOC32	11,33	0,35	0,22	0,17	0	0	
		BOC33	14,45	0,38	0,29	0,19	0	0	
		BOC34	26,83	0,22	0,20	0,50	0	0	
		BOC35	17,60	0,18	0,15	0,11	0	0	
		BOC37	10,08	0,31	0,13	0	0	0	
		BOC38	13,20	0,25	0,16	0,22	0	0	
		BOC40	10,14	0,23	0,13	0	0	0	
		BOC42	17,73	0,14	0,13	0,08	0	0	
		BOC45	19,03	0,14	0,11	0,13	0	0	
		BOC47	28,16	0,14	0,08	0,11	0	0	
	BOC49	16,23	0,13	0,12	0,09	0	0		
	BOC50	14,34	0,18	0,11	0,13	0	0		
	BOC51	20,72	0,17	0,11	0,07	0	0		
	BOC52	19,14	0,22	0,14	0,11	0	0		
	BOC53	12,86	0,20	0,11	0	0	0		
BOC57	14,67	0,19	0,12	0	0	0			
BOC58	16,17	0,14	0,12	0	0	0			
	<b>Mean</b>	<b>17,98</b>	<b>0,22</b>	<b>0,17</b>	<b>0,11</b>	<b>0,00</b>	<b>0,00</b>	<b>0,10</b>	
	B	BOC4	8,35	0,32	0,18	0	0	0	
		BOC24	23,69	0,36	0,12	0,25	0	0	
		BOC29	8,55	0,38	0,17	0	0	0	
		BOC30	16,23	0,33	0,18	0,08	0	0	
		BOC41	8,52	0,37	0,21	0,22	0	0	
		BOC48	31,31	0,41	0,19	0,28	0	0	
		BOC54	25,33	0,27	0,12	0,06	0	0	
		BOC55	17,54	0,29	0,15	0,16	0	0	
	<b>Mean</b>	<b>17,44</b>	<b>0,34</b>	<b>0,16</b>	<b>0,13</b>	<b>0,00</b>	<b>0,00</b>	<b>0,13</b>	
	C	BOC7	14,68	0,30	0,35	0,17	0	0	
		BOC39	19,41	0,14	0,24	0,09	0	0	
	<b>Mean</b>	<b>17,05</b>	<b>0,22</b>	<b>0,30</b>	<b>0,13</b>	<b>0,00</b>	<b>0,00</b>	<b>0,13</b>	
MIXED SHAPES	BOC6	16,11	0,29	0,12	0,12	0	0		
	BOC13	11,48	0,53	0,23	0,15	0	0		
	BOC19	17,74	0,71	0,26	0,13	0	0		
	BOC22	13,30	0,30	0,13	0,15	0	0		
	BOC23	11,73	0,37	0,21	0,11	0	0		
	BOC26	38,45	0,25	0,10	0,14	0,13	0		
	BOC36	11,56	0,37	0,18	0,12	0	0		
	BOC43	41,73	0,38	0,13	0,08	0,07	0		
	BOC44	23,65	0,61	0,08	0,09	0,08	0		
	BOC46	19,05	0,74	0,11	0,10	0,09	0		
	BOC11	41,57	0,20	0,12	0,35	0	0		
	BOC28	13,12	0,32	0,17	0,43	0	0		
	BOC56	16,17	0,18	0,13	0,30	0	0		
		<b>Mean</b>	<b>21,20</b>	<b>0,41</b>	<b>0,15</b>	<b>0,17</b>	<b>0,03</b>	<b>0,00</b>	<b>0,15</b>

Taula 17: Classificació morfològica a partir de l'aplicació de l'índex  $iT_x$  (veure'l a l'apartat 2.2.5.).

L'aplicació de l'índex  $iTx$  (explicat a l'apartat 2.2.5.) permet establir la classificació morfològica de les morfologies estudiades a partir de la relació existent entre els diferents perfils topogràfic transversals aixecats (T1, T2 i T3) i la longitud de la morfologia en qüestió. Així, dels resultats obtinguts a partir de l'aplicació d'aquest índex (Taula 17) es veu com els patrons de distribució morfològica són els mateixos i es corresponen a la classificació visual feta a partir de l'anàlisi fotomètric. Es veu que en el cas de les morfologies *trough blowout*, en termes generals, decreixen des de la boca (T1) cap al seu interior, no obstant distingint-ne alguns comportaments. Així es pot diferenciar entre els *trough blowouts* A ( $iT1= 0.22$ ,  $iT2= 0.17$ ,  $iT3= 0.11$ ), B ( $iT1= 0.34$ ,  $iT2= 0.16$ ,  $iT3= 0.13$ ) – els quals disminueixen la seva amplada a mesura que s'endinsen cap a l'interior del sistema –, i C ( $iT1= 0.22$ ,  $iT2= 0.30$ ,  $iT3= 0.13$ ) – els quals sofreixen un lleuger increment en l'amplada de la seva part central, però encara mantenen l'estructura de *trough* – (Taula 17 i Figura 75).



**Figura 75:** Representació esquemàtica a escala de la classificació morfològica a partir de l'aplicació de l'índex  $iTx$  (relacionada amb la Taula 17).



D'altra banda, les formes mixtes o *mixed blowouts* queden identificades per una major diferència en tant al *iTx* dels seus respectius perfils. En termes generals aquests varien la seva amplada bé en la seva boca – generalment quan es tracta de zones més fragmentades en el seu front –, o bé en la seva part interior – quan hi ha presència de lòbuls de deposició sedimentària – (Figura 75). La tendència general mostra la predominança de les morfologies mixtes caracteritzades per una major amplada al seu front, tal i com s'expressa amb la mitjana mostrada per cada secció a la Taula 17;  $iT1=0.41$ ,  $iT2=0.16$ ,  $iT3=0.17$ .

Per tal de posar en ordre quantitatiu un valor referent a la relació entre l'àrea del *blowouts* i cada una de les tipologies a partir dels perfils topogràfics realitzats, l'índex *iA* (explicat a l'apartat 2.2.5.) ens mostra com les *mixed shapes* són en general les que major àrea ocupen ( $iA=0.15$ ), seguides per les morfologies *trough blowout* tipus B i C ( $iA=0.13$ ), i en darrer lloc per les *trough blowout* tipus A, amb  $iA=0.10$ ).

#### 3.1.1.2.6. Inventaris florístics i caracterització taxonòmica del front dunar

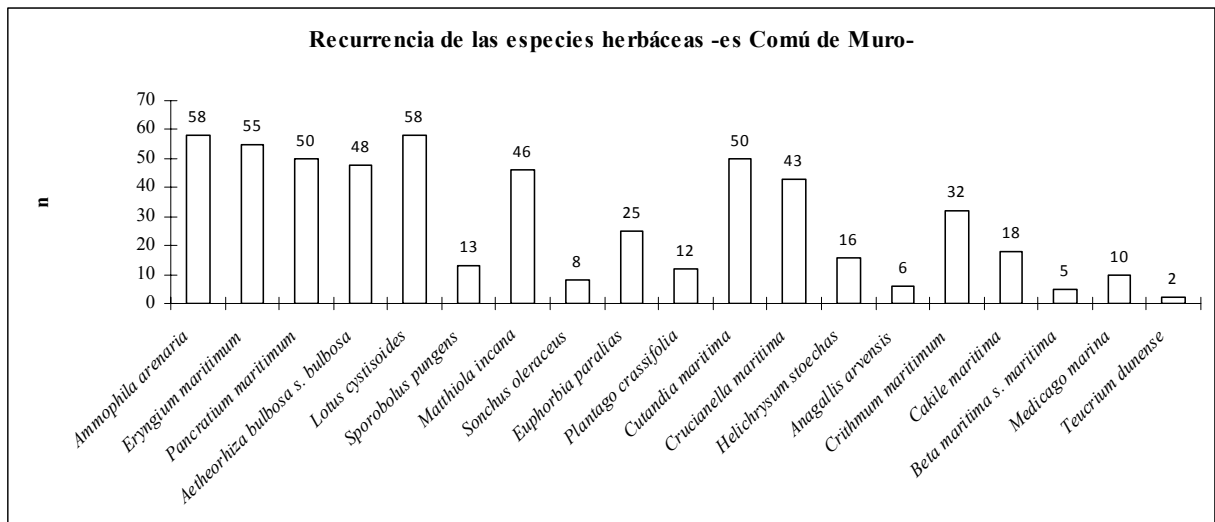
La vegetació és una de les variables més importants a tenir en compte alhora de parlar sobre l'estat de conservació del front dunar d'es Comú de Muro. Els resultats obtinguts manifesten que, en aquest cas, es poden diferenciar clarament dos grups vers a la vegetació existent; un primer format per espècies de característiques herbàcies, i un segon compost per espècies llenyoses o arbustives.

El primer grup és el que més pes mostra vers l'estat ecològic en el sistema dunar d'es Comú de Muro. Dels inventaris florístics realitzats se'n fa un recompte d'un total de 19 espècies herbàcies principals (Taula 18 i Figura 76), cada una d'elles amb diferents patrons de presència al llarg dels *blowouts* analitzats. Així, les espècies més comuns i recurrents, amb una presència que oscil·la entre els 58 i els 40 *blowouts*, són *Ammophila arenaria* i *Lotus cytisoides* (100%), *Eryngium maritimum* (94.83%), *Pancreatium maritimum* i *Cutandia maritima* (82.61%), *Aetheorhiza bulbosa* subsp. *bulbosa* (82.76%), *Matthiola incana* (79.31%) i *Crucianella maritima* (74.14%). Amb una ordre de presència oscil·lant entre els 40 i els 15 *blowouts* es poden trobar espècies tals com *Crithmum maritimum* (55.17%), *Euphorbia paralias* (43.10%), *Cakile maritima* (31.03%) i *Helichrysum stoechas* (27.59%). Finalment, les espècies amb una recurrència inferior als 15 *blowouts* són; *Plantago crassifolia* (20.69%), *Medicago*

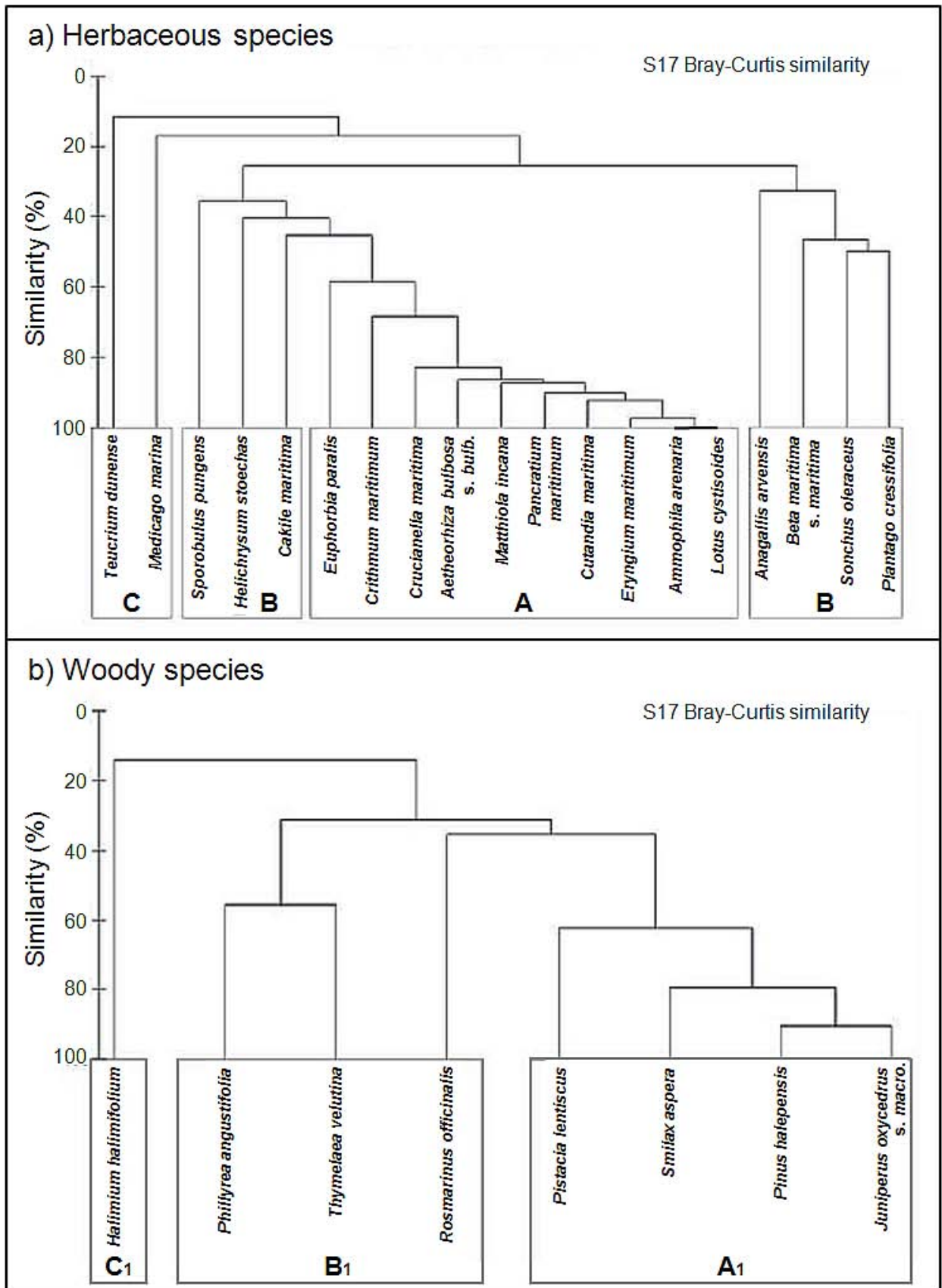
*maritima* (17.24%), *Sonchus oleraceus* (13.79%), *Anagallis arvensis* (10.34%), *Beta vulgaris* subsp. *maritima* (8.62%) i *Teucrium dunense* (3.45%) (Taula 18).

Herbàcies	Total	Total BO	%
<i>Ammophila arenaria</i>	58	58	100,00
<i>Eryngium maritimum</i>	55	58	94,83
<i>Pancreatium maritimum</i>	50	58	86,21
<i>Aetheorhiza bulbosa subs bulbosa</i>	48	58	82,76
<i>Lotus cytisoides</i>	58	58	100,00
<i>Sporobolus pungens</i>	13	58	22,41
<i>Matthiola incana</i>	46	58	79,31
<i>Sonchus oleraceus</i>	8	58	13,79
<i>Euphorbia paralias</i>	25	58	43,10
<i>Plantago crassifolia</i>	12	58	20,69
<i>Cutandia maritima</i>	50	58	86,21
<i>Crucianella maritima</i>	43	58	74,14
<i>Helichrysum stoechas</i>	16	58	27,59
<i>Anagallis arvensis</i>	6	58	10,34
<i>Crithmum maritimum</i>	32	58	55,17
<i>Cakile maritima</i>	18	58	31,03
<i>Beta maritima subs. maritima</i>	5	58	8,62
<i>Medicago marina</i>	10	58	17,24
<i>Teucrium dunense</i>	2	58	3,45

**Taula 18:** Espècies herbàcies identificades al llarg dels 58 *blowouts* analitzats a es Comú de Muro. Es mostra la seva recurrència en termes absoluts i percentuals sobre el total de la mostra.



**Figura 76:** La recurrència i importància de les espècies al llarg de les formes erosives *blowout* a n'es Comú de Muro és diferent. En termes absoluts hi ha notables diferències entre espècies tals com; *Ammophila arenaria*, la qual s'identifica en la totalitat de les morfologies analitzades, i d'altres com *Beta maritima* subsp. *maritima* o *Teucrium dunense*, les quals tenen una presència molt més discreta.



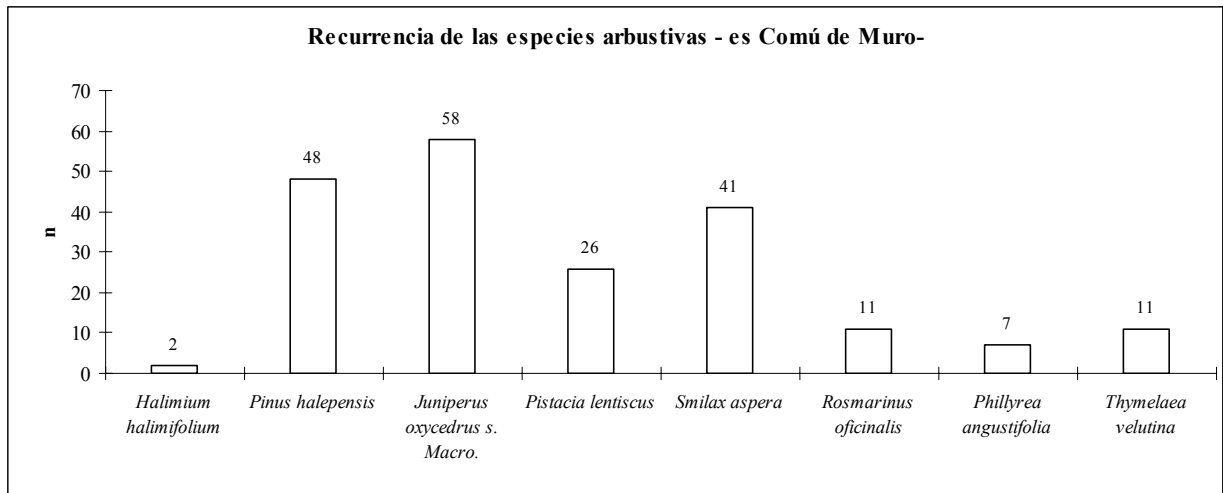
**Figura 77:** Agrupacions de les espècies vegetals identificades i mostrejades al front dunar d'es Comú de Muro a partir de la seva presència/absència en cada una de les morfologies. Les anàlisis *cluster* o dendrogrames han estat realitzats a partir de l'índex *Bray Curtis similarity*. A la part superior (A) es mostren les agrupacions derivades de les espècies herbàcies existents, mentre que a la part inferior de la imatge (B) es fa el propi amb el cas de les espècies llenyoses o arbustives (Mir-Gual et al., 2013).

Quan es considera el nivell de presència/absència de les diferents espècies en cada un dels punts de mostreig – *blowouts* – es poden identificar distintes associacions a partir de la seva similitud. En el cas de les espècies herbàcies es poden distingir un total de 3 grups diferents (Figura 77A). Un primer grup (A) queda compost per un total de 10 espècies; *Euphorbia paralias*, *Crithmum maritimum*, *Crucianella maritima*, *Aetheoritza bulbosa* subsp. *bulbosa*, *Matthiola incana*, *Pancratium maritimum*, *Cutandia maritima*, *Eryngium maritimum*, *Ammophila arenaria* i *Lotus cytisoides*, i està caracteritzat per un alt nivell d'associació entre cada una de les espècies que els formen, en alguns casos arribant al màxim de similitud; e.g. *Ammophila arenaria* i *Lotus cytisoides* (100%). Generalment, en aquest cas, el patrons d'associació entre les espècies és força alt, oscil·lant entre el 80-100%. Cap remarcar també, que si comparem aquest primer grup amb la Taula 18, existeix una alta correlació entre les espècies que donen lloc als màxims nivells d'associació i aquelles que tenen una major recurrència.

Un segon grup (B) està format per un total de 7 espècies (Figura 77A); *Cakile maritima*, *Helichrysum stoechas*, *Sporobulus pungens*, *Plantago crassifolia*, *Sonchus oleraceus*, *Beta maritima* subsp. *maritima* i *Anagallis arvensis*. Aquest grup es caracteritza per un grau d'associació entre espècies inferior a l'anterior, endemés d'una major heterogeneïtat vers als patrons d'associació donats. En aquest cas el valor mitjà de relació entre les espècies es manifesta amb valors que oscil·len entre el 20-65%. Finalment, el tercer grup (C) és el manco representatiu pel que fa al número d'espècies que el formen (Figura 77A). Així queda compost sols per dues espècies, *Teucrium dunense* i *Medicago maritima* les quals es relacionen entre sí sols en un 16.67%. Tal i com succeïa en el grup A, en aquest cas també existeix una forta correlació entre el nivell d'associació – en aquest cas de baix grau d'associació – i les espècies que mostren un menor pes de presència en el total de la mostra (Taula 18).

Llenyoses	Total	Total BO	%
<i>Halimium halimifolium</i>	2	58	3,45
<i>Pinus halepensis</i>	48	58	82,76
<i>Juniperus oxycedrus</i> subs. <i>Macrocarpa</i>	58	58	100,00
<i>Pistacia lentiscus</i>	26	58	44,83
<i>Smilax aspera</i>	41	58	70,69
<i>Rosmarinus officinalis</i>	11	58	18,97
<i>Phillyrea angustifolia</i>	7	58	12,07
<i>Thymelaea velutina</i>	11	58	18,97

**Taula 19:** Espècies llenyoses identificades al llarg dels 58 *blowouts* analitzats a es Comú de Muro. Es mostra la seva recurrència en termes absoluts i percentuals sobre el total de la mostra.

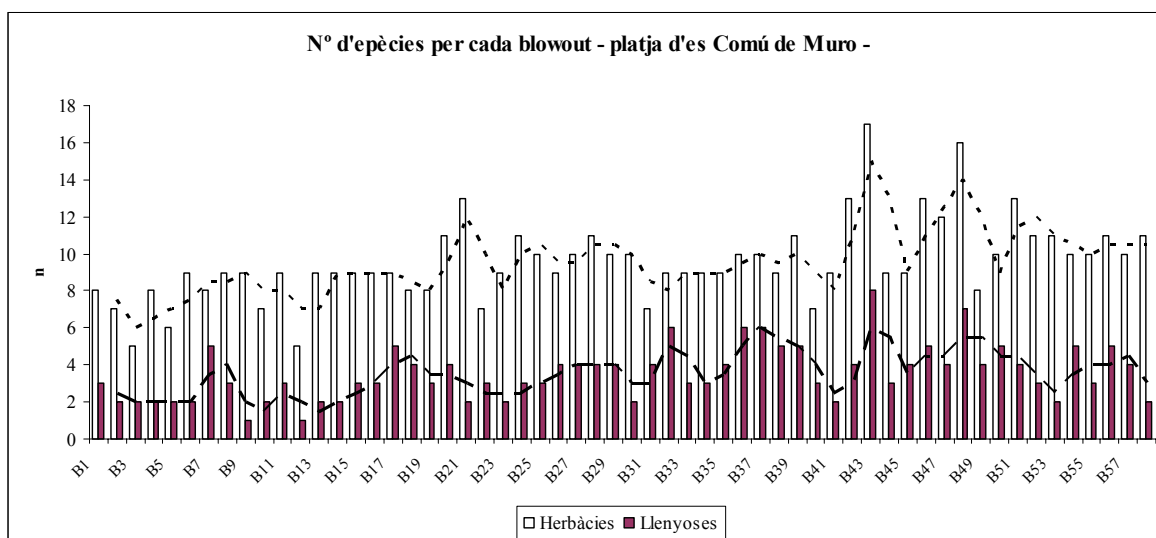


**Figura 78:** Tot i que la situació de les espècies arbustives sigui més simple que en el cas de les herbàcies, també existeixen diferències entre espècies alhora del pes que aquestes mostren al llarg dels 58 *blowouts* identificats i analitzats al llarg del front de dunes d'es Comú de Muro.

En segon lloc s'identifica la presència de distintes espècies, en aquest cas de característiques arbustives i/o llenyoses. No obstant la varietat mostrada en aquest cas és inferior que en el cas de les espècies herbàcies. Així s'identifica un total de 8 espècies, cada una d'elles mostrant patrons de presència diferents (Taula 19); *Halimium halimifolium* (3.45 %), *Pinus halepensis* (82.76%), *Juniperus oxycedrus* subsp. *macrocarpa* (100%), *Pistacia lentiscus* (44.83%), *Smilax aspera* (70.69%), *Rosmarinus officinalis* ( 18.97%), *Phillyrea angustifolia* (12.07%), i *Thymelaea velutina* (18.97). No obstant, i a l'igual que succeïa en el cas anteriorment comentat, si es consideren els valors absoluts de presència per cada una de les espècies existeixen notables diferències (Figura 78); e.g. *Juniperus oxycedrus* subsp. *macrocarpa* (100%) i *Halimium halimifolium* (3.45%).

Pel que fa als nivells d'associació en el cas de les espècies llenyoses la situació és més senzilla que en el cas de les herbàcies, no només pel menor nombre d'espècies que el conformen, sinó també per una major senzillesa vers als patrons d'associació derivats entre elles. Un total de 8 espècies queden associades en 3 grups (Figura 77B). El primer ( $A_1$ ) està compost per 4 espècies, *Pistacia lentiscus*, *Smilax aspera*, *Pinus halepensis*, *Juniperus oxycedrus* subsp. *macrocarpa* les quals es relacionen amb nivells que oscil·len entre el 65-90%. El màxim grau d'associació es dona entre *Pinus halepensis* i *Juniperus oxycedrus* subsp. *macrocarpa* (90.56%), ambdues notablement relacionades també amb *Smilax aspera*. Un segon grup ( $B_1$ ) està compost sols per 3 espècies, *Rosmarinus officinallis*, *Thymelaea velutina* i *Phillyrea angustifolia*, amb valors no massa distants als mostrats en  $A_1$ . En aquest cas *Thymelaea velutina* i *Phillyrea*

*angustifolia* es relacionen en un 55.55%, i ambdues es troben associades amb *Rosmarinus officinalis* en un 35%. Finalment, el crup C<sub>1</sub> es troba format sols per una espècie, *Halimium halimifolium*, la qual, degut a la seva baixa presència, manté una relació gairebé nul·la amb la resta de la mostra.

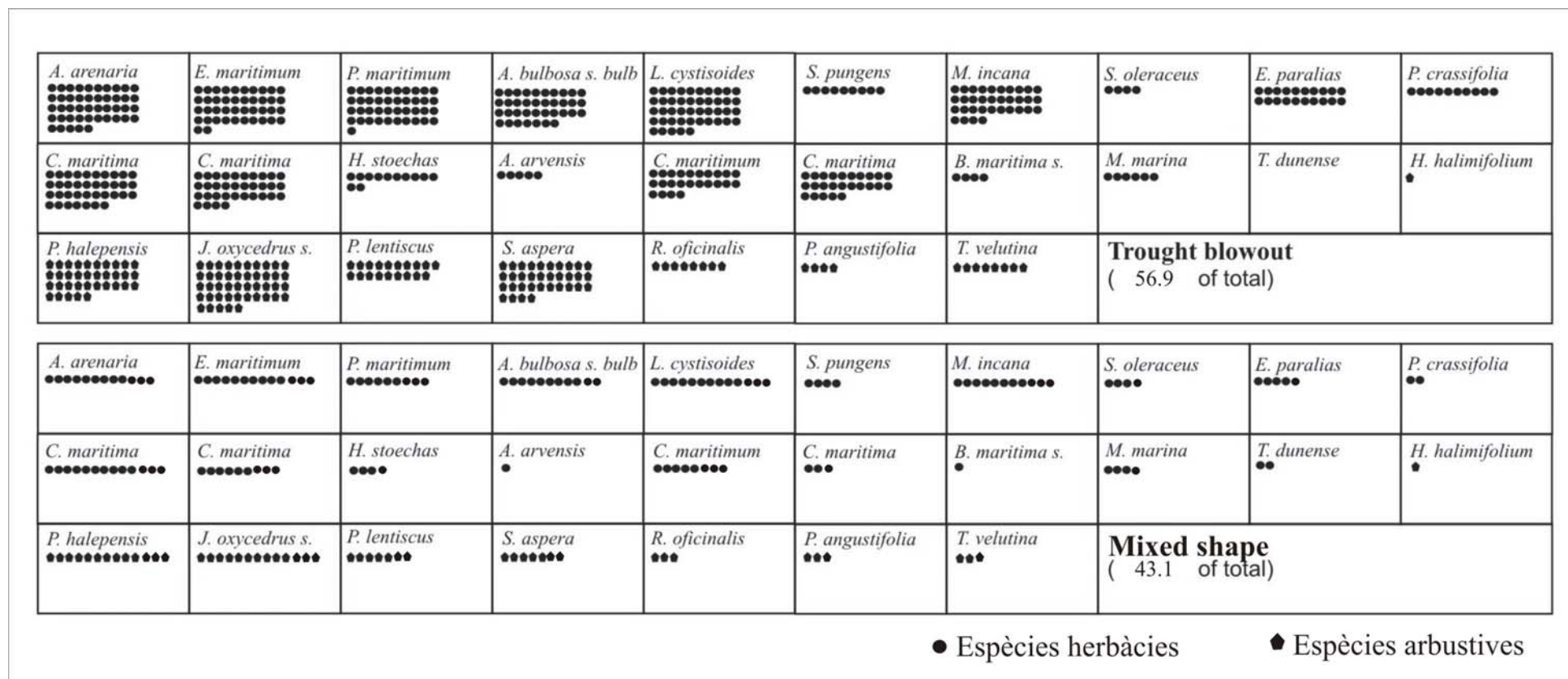


**Figura 79:** Representació gràfica de les diferències existents entre el número d'espècies herbàcies i llenyoses identificades per a cada un dels 58 *blowouts* al sistema d'es Comú de Muro.

Tal i com ja ha quedat palès existeixen diferències substancials vers a la presència que les dues tipologies de vegetació tenen al llarg dels punts de mostreig analitzats en el front de dunes d'es Comú. En aquest sentit la Figura 79 reflecteix clarament com el pes de les espècies herbàcies és notablement superior al que presenten les espècies de característiques arbustives i/o llenyoses. Es veu doncs que en la totalitat dels 58 *blowouts* analitzats el número d'herbàcies sempre és superior a les arbustives. No obstant, remarcar que les diferències no sols es donen pel que fa a les espècies, sinó també entre *blowouts*. D'aquesta manera veiem morfologies que suporten un gran nombre d'espècies, e.g. BOC43 (amb 17 espècies herbàcies i 8 llenyoses), vers al BOC12 (sols amb 5 herbàcies i 1 llenyosa).

### 3.1.1.2.7. Patrons de relació botànica-geomorfològica

El nivell de presència que les diferents espècies identificades mostren vers a les diferents tipologies de *blowout* també mostra diferències importants. Si es contempla el grau de presència en termes absoluts la Figura 80 mostra com les morfologies *trough blowout* són les que major número d'espècies contempnen, sobretot pel que fa a les espècies de característiques herbàcies.



**Figura 80:** Representació gràfica del pes que cada una de les espècies – en termes absoluts – presenten les diferents tipologies existents al llarg del front d'es Comú de Muro. En aquest cas el número de punts associats a cada espècie representa la seva presència vers cada una de les tipologies.

No obstant, el pes percentual dels *trough blowouts* (56.9%) sobre la mostra total és superior al pes que mostren les formes mixtes (43.1%). Així doncs, per tal d'estandarditzar els patrons de relació real entre les diferents espècies i les tipologies de *blowouts* existents s'aplica l'índex  $R_{t-v}$  (Taula 20) el qual mostra com el nivell de relació entre ambdues variables, en aquest cas, és molt més homogeni en cada tipologia.

$R_{t-v}$	Trough blowout	Mixed shape
	56,90%	43,10%
<i>Ammophila arenaria</i>	1	0,9
<i>Eryngium maritimum</i>	0,9	1,0
<i>Pancratium maritimum</i>	0,9	0,7
<i>Aetheorhiza bulbosa subs. bulbosa</i>	0,8	0,8
<i>Lotus cytisoides</i>	1	1,0
<i>Sporobolus pungens</i>	0,2	0,3
<i>Matthiola incana</i>	0,8	0,9
<i>Sonchus oleraceus</i>	0,1	0,3
<i>Euphorbia paralias</i>	0,4	0,4
<i>Plantago crassifolia</i>	0,2	0,2
<i>Cutandia maritima</i>	0,8	1,0
<i>Crucianella maritima</i>	0,8	0,7
<i>Helichrysum stoechas</i>	0,3	0,3
<i>Anagallis arvensis</i>	0,1	0,1
<i>Crithmum maritimum</i>	0,5	0,6
<i>Cakile maritima</i>	0,3	0,2
<i>Beta maritima s. maritima</i>	0,1	0,1
<i>Medicago marina</i>	0,1	0,3
<i>Teucrium dunense</i>	0,0	0,2
<b>Herbaceous - tipologies</b>	<b>0,5</b>	<b>0,5</b>
<i>Halimium halimifolium</i>	0,0	0,1
<i>Pinus halepensis</i>	0,8	1,0
<i>Juniperus oxycedrus subs. macrocarpa</i>	1	1,0
<i>Pistacia lentiscus</i>	0,4	0,5
<i>Smilax aspera</i>	0,8	0,5
<i>Rosmarinus officinalis</i>	0,2	0,2
<i>Phillyrea angustifolia</i>	0,1	0,2
<i>Thymelaea velutina</i>	0,2	0,2
<b>Woody - tipologies</b>	<b>0,4</b>	<b>0,5</b>

**Taula 20:** Valors derivats de l'aplicació de l'índex 0-1  $R_{t-v}$  per a tal de determinar els patrons de relació reals entre les espècies vegetals identificades i les tipologies de *blowout* al sistema d'es Comú.

En termes generals, les espècies identificades al llarg de les 58 morfologies erosives analitzades al sistema d'es Comú de Muro es relacionen de manera semblant amb cada una de les tipologies descrites. Així, en la Taula 20 es mostra com, en el cas de les espècies herbàcies aquestes es relacionen d'igual manera tant amb les morfologies *trough* com amb les formes mixtes (ambdós amb valors de  $R_{t-v} = 0.5$ ). La situació no canvia gaire en el cas de les espècies llenyoses, si bé és cert que en aquest

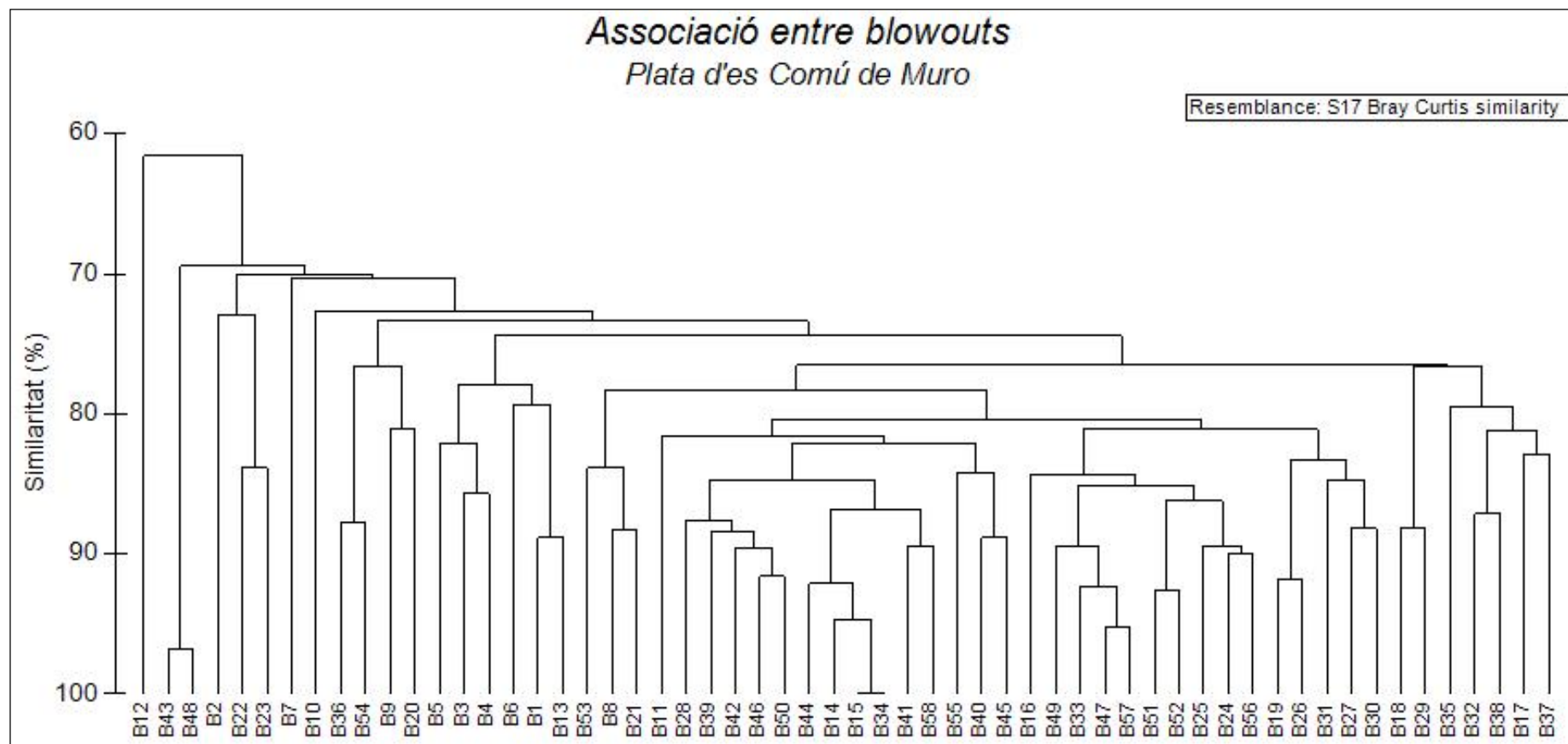


cas aquestes es relacionen de forma lleugerament superior amb les espècies llenyoses ( $R_{t-v} = 0.5$ ) que amb les herbàcies ( $R_{t-v} = 0.4$ ). Més en detall es tornen percebre diferències substancials entre espècies. En el cas de les herbàcies hi ha casos que es relacionen altament amb ambdues tipologies; e.g. *Ammophila arenaria* ( $R_{t-v} = 1$  i  $0.9$  respectivament), *Eryngium maritimum* ( $R_{t-v} = 0.9$  i  $1$  respectivament), o *Pancratium maritimum* ( $R_{t-v} = 0.9$  i  $0.7$  respectivament), i d'altres a on la relació és molt més pobre; e.g. *Medicago marina* ( $R_{t-v} = 0.1$  i  $0.3$  respectivament) o *Teucrium dunense* ( $R_{t-v} = 0.0$  i  $0.2$  respectivament). El mateix ocorre en el cas de les arbustives, amb espècies altament vinculades a cada una de les tipologies; e.g. *Pinus halepensis* ( $R_{t-v} = 0.8$  i  $1$  respectivament) o *Juniperus oxycedrus* subs. *macrocarpa* ( $R_{t-v} = 1$  i  $1$  respectivament), i d'altres amb valors substancialment inferiors; e.g. *Halimium halimifolium* ( $R_{t-v} = 0.0$  i  $0.1$  respectivament) o *Phillyrea angustifolia* ( $R_{t-v} = 0.1$  i  $0.2$  respectivament).

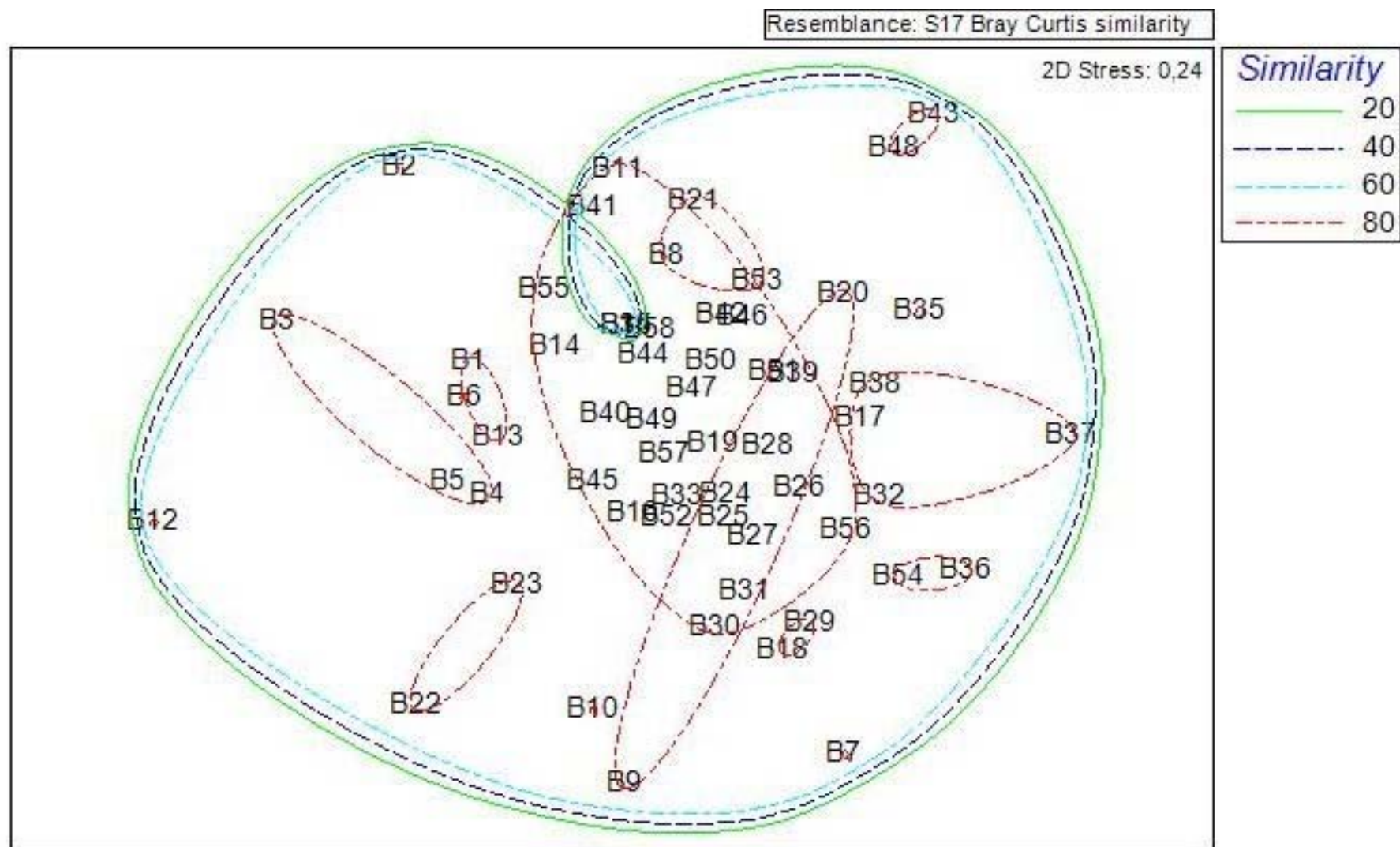
#### 3.1.1.2.8. Caracterització i agrupació integrada dels *blowouts*

L'anàlisi integral dels 58 *blowouts* analitzats al llarg del front de dunes d'es Comú de Muro reflecteix una tendència notablement heterogènia pel que fa al grau de similitud que presenten entre ells, tal i com reflecteix la Figura 81. Aquesta anàlisi, feta a partir de la consideració de totes les variables estudiades per a cada punt de mostreig – siguin doncs les referides al seu estat geomorfològic, ecològic i de gestió – mostra una complexitat derivada, primer del gran nombre de morfologies contemplades, i en segon lloc de la gran quantitat de variables considerades. Tot i que a primera vista es pugui percebre la manca de similitud entre els punts de mostreig analitzats, aquesta es mou en valors alts que oscil·len entre el 70-100%, fent doncs que la seva semblança des del punt de vista ecològic, geomorfològic i de gestió sigui força elevada.

No obstant, dintre d'aquest rang de similitud es donen diferències constants que estableixen patrons difícilment identificables a partir de l'anàlisi *cluster* dut a terme. Un nombre importants de *blowouts* mantenen entre sí patrons de similitud notables, superiors al 80%. Veure per exemple la part central de les Figures 81 i 82. En alguns casos, tot i que de forma molt aïllada, el grau de similitud pot arribar al 100%, com ocorre en el cas entre els B15 i el B34. En contraposició, es presenten algunes morfologies que queden un tant aïllades de la majoria, i que es relacionen amb valors inferiors al 70%; e.g. B12, B43 o B48.



**Figura 81:** Anàlisi *cluster* dels 58 *blowouts* analitzats a n'es Comú de Muro a partir de la consideració de les seves característiques geomorfològiques, ecològiques i estat de gestió..

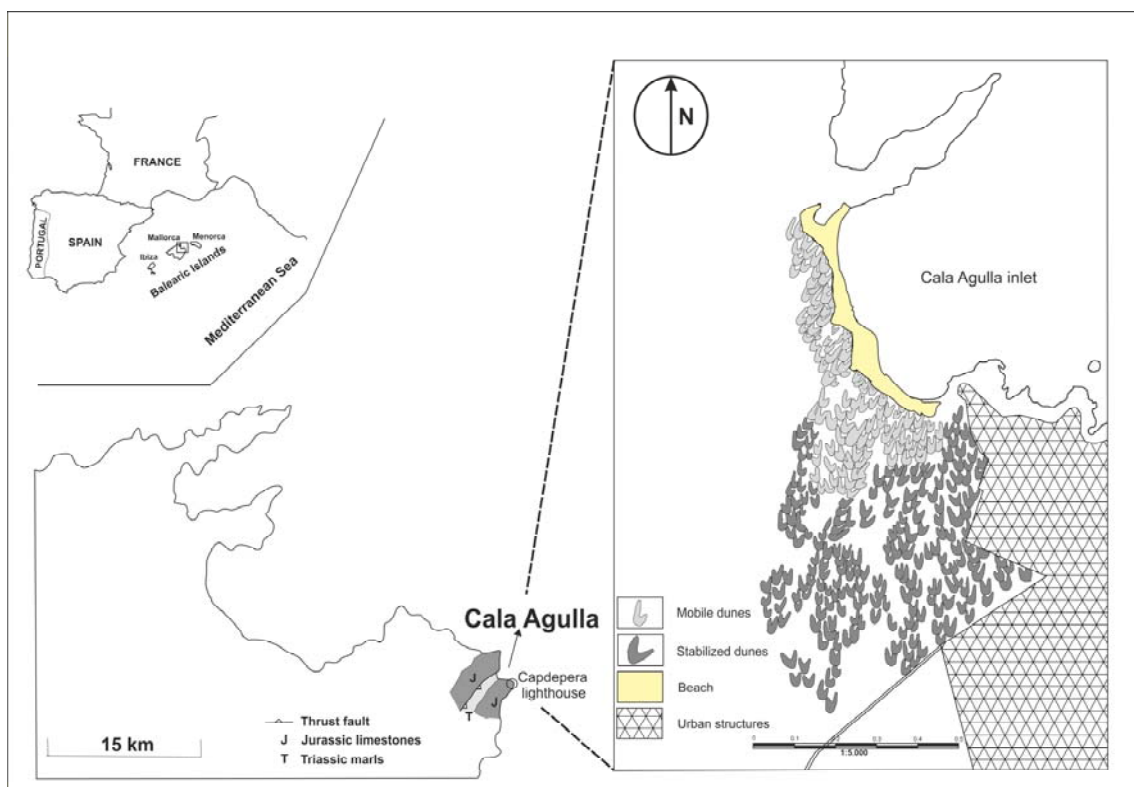


**Figura 82:** Representació – sense escala – de la dispersió mostrada per a cada un dels *blowouts* analitzats en funció del seu grau de similitud, relacionat amb les línies d'unió mostrades. Aquesta figura es relaciona amb la Figura 81.

### 3.1.2. Sistema dunar de Cala Agulla

#### 3.1.2.1. Localització i caracterització geogràfica del sistema

El sistema platja-duna es localitza al quadrant oriental de l'illa de Mallorca (Illes Balears), dins els límits del municipi de Cala Ratjada, situat al que es coneix com a la península de Llevant (Figura 83). El sistema, en la seva integritat, s'estén al llarg d'uns 1.7 km<sup>2</sup> dels quals 0.53 km<sup>2</sup> es corresponen a formacions dunars holocenes (Servera, 1997; 2002). El sistema es desenvolupa terra endins a partir d'una línia de costa d'uns 600 m de longitud. En termes generals els cordons de dunes que s'identifiquen tenen una disposició paral·lela a la línia de costa la qual els alimenta des del punt de vista sedimentari. Estructuralment la cala es troba inserida dins el sistema de falles i plegaments que donen lloc a les Serres de Llevant. Es desenvolupa sobre margues del Triàssic, i es troba envoltada per caps formats per calcàries del Juràssic. Amb tot, la cala es troba oberta al NE, per la qual cosa la disposició i desenvolupament de les morfologies dunars quedarà també condicionada per la seva orientació estructural.



**Figura 83:** Localització geogràfica del sistema de Cala Agulla, i representació esquemàtica de les seves característiques geològiques i geomorfològiques (Mir-Gual et al., en revisió).

El forts problemes erosius soferts al sistema platja-duna de Cala Agulla al llarg de les darreres dècades, sobretot al sector de dunes davanteres (veure més extensament a l'epígraf 3.1.2.1.1.) fan que avui es percebi una alteració geomorfològica important pel que fa a l'estructura del sistema des d'un punt de vista integral. Aquest fet suposa doncs que sigui complex identificar i definir de manera nítida una franja de dunes davanteres, així com també un cordó de dunes mòbils. El sistema adopta una forma rampant que va des de la platja cap a l'interior. No obstant, la gradació geomorfològica i ecològica avui es troba notablement alterada. A grans trets, tal i com ja es mencionava en el cas d'es Comú de Muro, es distingeix clarament la platja emergida de la resta del sistema dunar adjacent. No obstant, l'actual estat d'aquest darrer en fa difícil la seva caracterització, sobretot a la zona limítrofa amb la platja emergida.



**Figura 84:** Sectorització del sistema platja-duna de Cala Agulla (Mallorca). A la figura es percep l'alt grau de fragmentació i erosió sofert a la seva part davantera, fent notablement identificables els cordons de dunes davanteres – embrionàries – i el cordó de dunes mòbils o semiestabilitzades.

Amb aquest escenari avui no és fàcil diferenciar i identificar el cordó de dunes davanteres, format principalment per formacions arenoses embrionàries, del cordó de dunes mòbils o semiestabilitzades. Els problemes erosius soferts han provocat un retrocés integral del front dunar, derivant-ne alhora amb una homogeneïtzació dels dos cordons esmentats. Des del punt de vista dinàmic doncs – entenent-ho com la part del sistema que encara juga un paper en el seu balanç sedimentari – aquests dos cordons han quedat associats entre sí esdevenint-se la part mòbil actual (Figura 84). Finalment, es distingeix el sistema de dunes estabilitzades, principalment per un bosc ben desenvolupat de *Pinus halepensis*. No obstant, l'avanç erosiu del front de duna està

alterant aquest cordó, tal i com es percep a la Figura 84, a l'igual que també ho ha fet la pressió antròpica associada a la zona; e.g. fragmentació del sistema amb els accessos a la platja, construccions de restaurants, aparcaments per a vehicles, etc.

#### 3.1.2.1.1. Sector de dunes davanteres

Avui dia és impossible identificar un cordó definit per dunes davanteres al sistema de Cala Agulla. El processos erosius soferts en aquest ambient al llarg dels darrers decennis, principalment associats a la forta pressió antròpica, i també, a les males praxis de gestió aplicades, han suposat la gairebé total abolició de les característiques ecològiques i geomorfològiques que haurien de caracteritzar la primera línia de duna en condicions naturals.



**Figura 85:** Primera línia del sistema dunar de Cala Agulla. Tal i com es contempla a les imatges, el grau d'erosió mostrat actualment per aquesta franja és notablement alt, fent impossible diferenciar-ne cap mena de formació embrionària.

La situació actual del sistema en qüestió suposa que la gradació des de la platja alta a cap al sistema de dunes estigui notablement alterada. La Figura 85A reflecteix nítidament el degradat estat en el que es troba la primera línia de duna. Així, és comú veure vestigis de dunes originàries que, avui encara, han resistit als processos erosius, normalment a conseqüència de la presència de vegetació de caràcter arbustiu que les fixa. Si s'analitza la situació més al detall, es fa difícil també identificar formacions embrionàries tals com *echo dunes* o *shadow dunes*, així com una cobertura de vegetació herbàcia que ajudi al desenvolupament geomorfològic de dites morfologies (Figura 85B). Sembla ser doncs que aquesta situació ha de ser considerada a l'hora d'analitzar

el comportament i la dinàmica existent en la resta del sistema. El mal estat de conservació de la primera línia de duna ajudarà i potenciarà el desenvolupament de morfologies erosives que s'estenen des de la primera línia de cap a l'interior del sistema de dunes, incrementant així els patrons erosius.

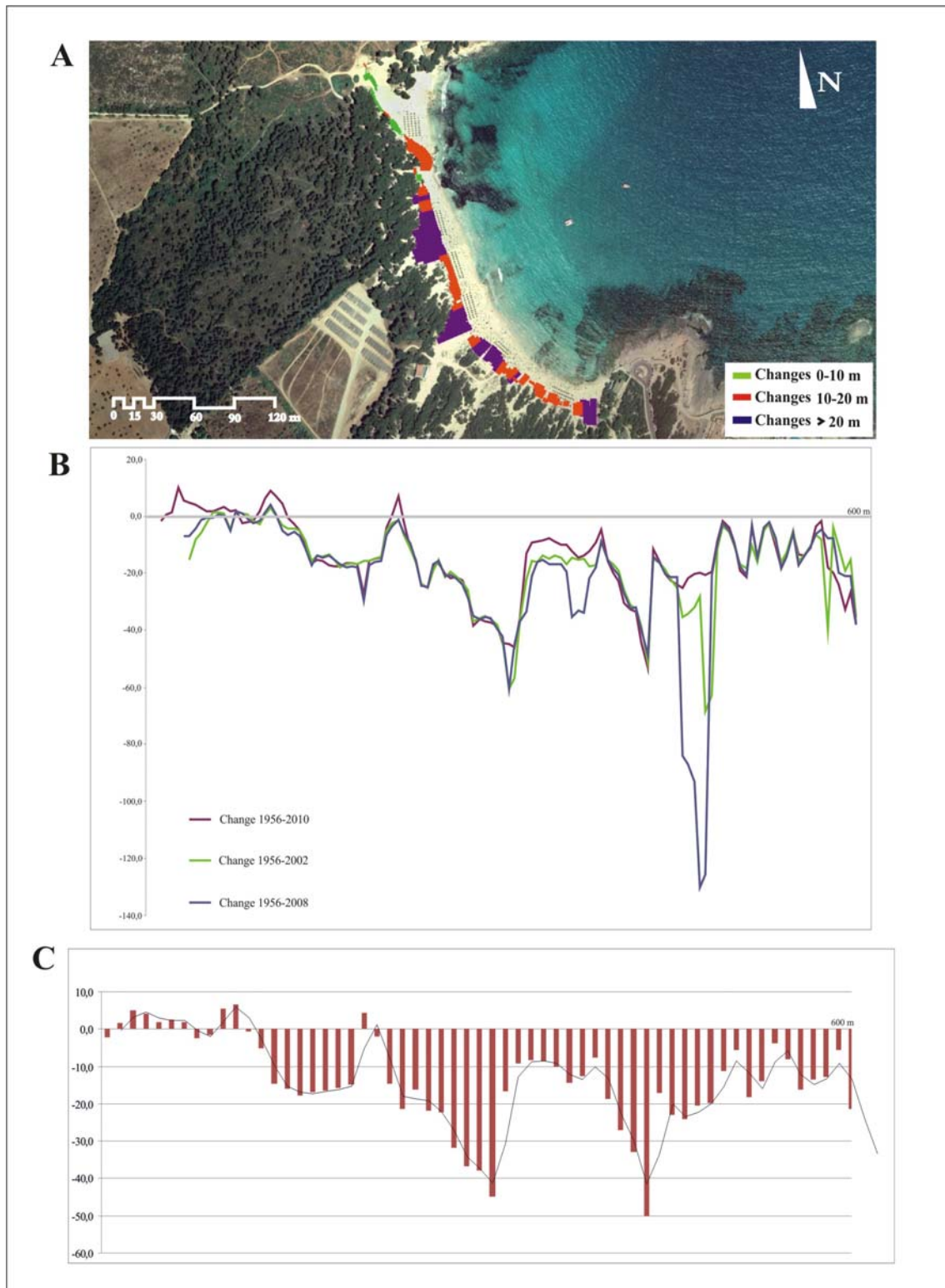
#### 3.1.2.1.2. Sector de dunes mòbils o semiestabilitzades

Més que un cordó definit de dunes mòbils, avui, en el cas de Cala Agulla, cal parlar d'una franja mòbil condicionada i derivada dels problemes de conservació existents en la primera línia del sistema, controlada principalment pels severos problemes d'erosió (Figura 86). En aquest sentit doncs, la part mòbil actual del sistema queda condicionada per plataformes que, derivades dels problemes erosius, canalitzen la dinàmica eòlica i sedimentària des de la platja emergida a l'interior del sistema de dunes. Així doncs, no és possible definir el sistema de dunes mòbils o semiestabilitzades originàries, controlades principalment pels processos geomorfològics típics i associats a aquests ambients.



**Figura 86:** Panoràmica de l'estat de degradació existent actualment en el cordó de dunes semiestabilitzades en el sistema de Cala Agulla (Mallorca). Tot i les mesures de gestió aplicades, els processos erosius continuen donant-se en aquesta franja, condicionant així l'extensió dels patrons d'erosió de cap a l'interior del sistema.

Segons Servera (1997) el sector de dunes mòbils – entenent-ho com a la part activa des del punt de vista sedimentari – s'estén des del límit superior de la platja alta entre uns 100-300 m terra endins, cobrint una superfície aproximada als 110.000 m<sup>2</sup>. Es tracta de dunes parabòliques, organitzades bé a partir de formacions simples o compostes, i amb una orientació NNE-SSW. Aquesta franja es troba altament condicionada per la presència de *blowouts* que es desenvolupen des de la primera línia cap a l'interior del sistema (veure més extensament a l'epígraf 3.1.2.2.).



**Figura 87:** Resultats gràfics de les anàlisis espai-temps realitzades sobre el front de dunes del sistema de Cala Agulla (Mallorca) entre els anys 1956-2008; A) nivells de retrocés (expressats en metres) del front dunar a partir de la situació de 1956, B) mostra les tendències de retrocés del front de dunes en diferents intervals temporals. La línia horitzontal (gris) representa el nivell de la primera línia al 1956, i a partir d'ella s'estableixen les tendències en cada un dels intervals analitzats; 1956-2002; 2008, C) representa gràficament el retrocés total acumulat des de 1956 fins a l'actualitat. Tots els valors en les gràfiques B i C són expressats en metres.



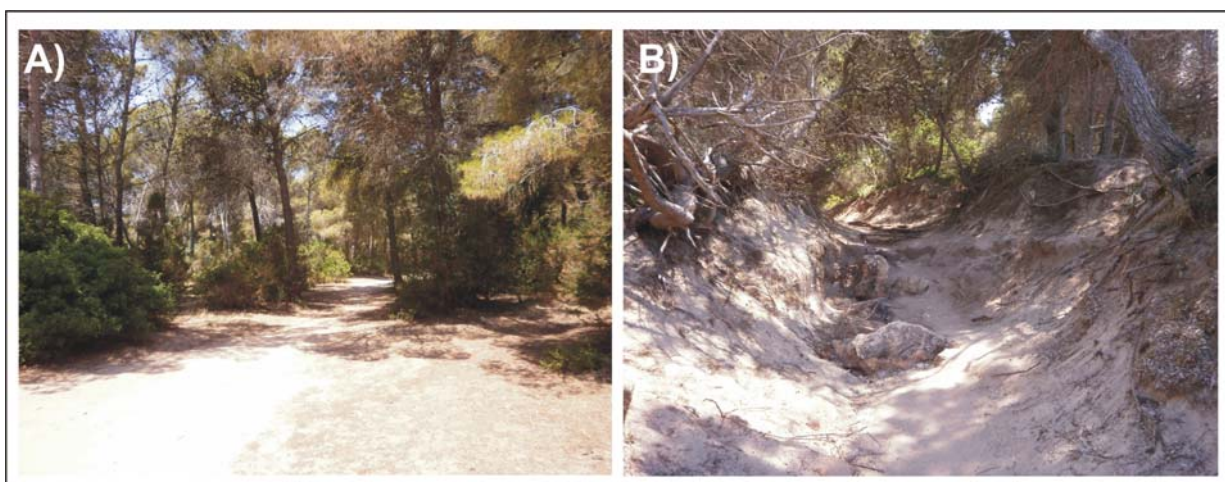
El sistema dunar de Cala Agulla, principalment controlat pel comportament i evolució sofert al llarg del seu front de dunes, ha sofert un important retrocés – terra endins – al llarg de les darreres dècades. L’anàlisi espai-temps realitzat sobre el devenir del sistema al llarg de 54 anys (Figura 87) mostra com el retrocés abans esmentat ha estat considerable i compressiu, no obstant amb diferents intensitats al llarg del front de duna. Les zones a on el retrocés ha estat inferior, oscil·lant entre els 0-10 m, es localitzen al sector nord de la platja, coincidint amb la zona més aïllada de les principals entrades per part dels usuaris (Figura 87A). D’altra banda, els punts amb major retrocés, superior als 20 m, es localitzen a la part central o al sector sud, coincidint amb les principals entrades a la platja, bé des del nucli urbà limítrof, o bé des de l’interior del sistema dunar consolidat – aparcament, nucli urbà –. En termes generals, els patrons mitjans de retrocés es mouen entorn als 10-20 m.

No obstant, els patrons de retrocés i erosió del front dunar han estat progressius al llarg del temps (Figura 87B). Així, pel que respecta a la situació inicial mostrada al 1956, la regressió soferta al 2002 i 2008 ha estat integral i compressiva, mostrant alhora una tendència i un comportament força homogeni. Destacar de nou que les àrees amb major retrocés tant en els períodes 1956-2002 com 1956-2008 tornen a coincidir amb els principals punts d’accés a la platja per part dels usuaris, amb màxims que, en aquest segon període, superen els 120 m. No obstant, cal fer esment al lleuger canvi que es dona si analitzem la situació al 2010 ja que, tot i que els patrons d’erosió i retrocés es segueixen desenvolupant de manera extensa, aquests disminueixen en alguns punts, inclús derivant-ne amb processos d’acreció sedimentària en primera línia. Aquest fet fa pensar doncs que les tasques de restauració del sistema dunar iniciades per les administracions competents cap al 2008 poden estar íntimament relacionades amb tal escenari. En detriment d’aquesta situació, al 2010 segueix imperant la tendència de que els màxims nivells de retrocés es corresponen amb les principals entrades a la platja, suggerint doncs una alta correlació entre erosió i punts a on la pressió antròpica és més elevada.

Tot i algunes tendències positives i puntuals d’ençà de 2010 però, tanmateix, la tendència general passa per un estat de degradació important del front dunar de Cala Agulla, manifestat per un retrocés integral del seu front de duna a llarg dels darrers decennis, el qual ha condicionat l’actual situació del cordó de dunes davanteres i el de dunes mòbils o semiestabilitzades (Figura 87C).

### 3.1.2.1.3. Sector de dunes estabilitzades

La franja de dunes consolidades del sistema platja-duna de Cala Agulla també ha sofert importants impactes al llarg dels darrers decennis, principalment associats a la mà de l'home. El fort i intensiu procés urbanitzador de la zona, així com també la desforestació per a l'aprofitament agrícola en terres adjacents han jugat un paper clau vers la situació actual (Mir-Gual, et al., 2010). No obstant, avui aquesta encara és una zona fàcilment identificable dintre de la integritat del sistema (Figura 83). Es tracta d'un sistema fixat principalment per un bosc de *Pinus halepensis* (Figura 88A), amb dunes parabòliques organitzades de manera simple, o bé de manera composta de tipus digitades – *digitated* –, *nested* o superposades – *superimposed* –. El conjunt de totes les dunes estabilitzades ocupa actualment una superfície d'aproximadament 39.4 ha (Servera, 1997).



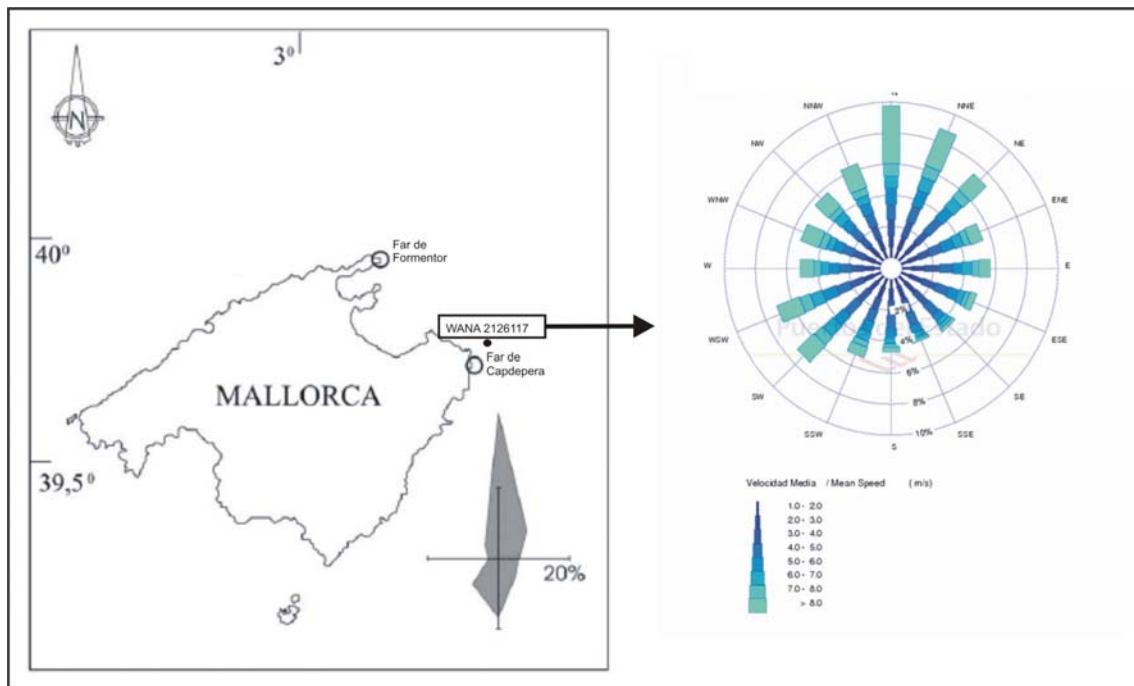
**Figura 88:** Imatges del sistema de dunes fixes i consolidades al sistema de Cala Agulla (Mallorca); A) desenvolupament d'un bosc important dominat per la presència d'un estrat arbori format per *Pinus halepensis* i sotabosc d'espècies de característiques herbàcies tals com *Pistacia lentiscus*, B) imatge sobre l'estat de fragmentació sofert en el sistema de dunes consolidades a conseqüència de la pressió antròpica, principalment expressada per l'obertura de camins.

L'atractiu turístic de la zona, i la seva proximitat a nuclis amb altes concentracions d'usuaris, sobretot en temporada estival, ha fet que aquesta zona no hagi quedat aliena als impactes antròpics derivats. Així, la construcció d'aparcaments o restaurants ha suposat una desestabilització del sistema no poc considerable. Endemés, la fragmentació del sistema com a conseqüència del pas dels usuaris és un fet comú avui dia, derivant-ne disruptions

geomorfològiques importants, en molts casos acompanyes per problemes d'erosió (Figura 88B).

#### 3.1.2.1.4. Caracterització climàtica

Amb velocitats superiors als  $4 \text{ ms}^{-1}$  els vents predominants en el far de Capdepera (Figura 89) en el període 1960-1981 foren, en un 41% dels dies, de component nord (Servera, 1997). Aquesta tendència queda mostrada també pel registres de la boia WANA2126117, localitzada enfront del sistema platja-duna de Cala Agulla (Figura 89) en la qual, pel període 1996-2013, els vents predominants són els de component N, amb també una importància rellevant dels de component NE. Així, i degudes les característiques estructurals que envolten el sistema platja-duna en qüestió, els vents de component N i NE són els que major influència tenen vers al comportament i desenvolupament del sistema dunar associat. Cap dir que, tot i que la boia WANA2126117 registri una incidència important de vents de component OSO, l'efecte orogràfic provocat per les Serres de Llevant fa que aquests no es percebin com a importants vers al comportament del sistema platja-duna des d'un punt de vista geomorfològic.



**Figura 89:** Representació gràfica dels vents predominants incidents sobre el sistema de Cala Agulla. A la imatge esquerra la predominança dels vents registrats pel far de Capdepera (Servera, 1997). A la dreta la rosa de vents de la boia WANA2126117 entre el període 1996-2013 ([www.puertos.es](http://www.puertos.es)).

Es tracta d'una zona micromareal, sols amb un rang de marea de 0.25 m. Les estimacions d'onatge per WANA2126117 en el període 1996-2003 indiquen que en un 70% dels dies les ones registraven potències inferiors a 1 m, amb un període de recurrència oscil·lant entre els 4-7 s. Només en un 3% dels dies es dona onatge de gran magnitud, amb ones superiors als 3 m d'altura. En aquest sentit es tracta d'una zona amb baixa energia refractada sobre la línia de costa provinent de la mar, a excepció dels temporals de mar que puntualment s'hi donen.

### 3.1.2.2. *Les morfologies blowouts al sistema de Cala Agulla. Resultats*

El sistema dunar de Cala Agulla, tot i les seves reduïdes dimensions pel que fa al seu front de duna – uns 600 m aproximadament –, es troba avui notablement fragmentat. Aquest alt grau de degradació es deu, principalment, a la presència de 14 morfologies *blowout* en primera línia (Figura 90), a part també de l'estat erosiu de la platja alta i de la primera línia de *foredunes*.

La distribució de dites morfologies no es manifesta de forma homogènia. Les màximes densitats es localitzen al sector sud de la platja, conicidint amb els principals punts d'accés per part dels usuaris, mentre que les densitats més baixes es troben al sector septentrional de la mateixa. Pel que fa a la relació mostrada entre la longitud del front de duna i la quantitat de morfologies existents, la densitat de les mateixa queda expressada, a l'igual que en el cas d'es Comú de Muro (epígraf 3.1.1.2.), en 0.04 *blowout*/m (o 1 *blowout* cada 42 m).

A part dels diferents patrons mostrats per la distribució i la densitat, les dimensions mostrades per cada morfologia també mostren diferències fàcilment identificables. D'aquesta manera algunes morfologies, tals com BOA8 o BOA12, destaquen per les seves gran dimensions, ambdues coincidint amb punts importants d'accés a la platja, en aquest cas des de l'interior del sistema dunar consolidat,

Tal i com passava amb la situació descrita anteriorment a n'es Comú de Muro, en el cas de Cala Agulla s'identifica també una zona degradada (ZD), no obstant en aquest cas, aquesta no es caracteritza tant per la interconnexió de *blowouts* simples en segona línia, sinó més bé per un retrocés progressiu del front dunar a conseqüència de severos problemes erosius els quals han suposat a l'actualitat notables signes de degradació geomorfològica i ecològica (Figura 90).



**Figura 90:** Localització de les 14 morfologies *blowout* i la zona degradada al llarg del front dunar Cala Agulla (Mallorca). A la part inferior esquerra es representa la rosa de direccions generada a partir de les 14 morfologies.

### 3.1.2.2.1. Dimensió i gradients de pendents dels *blowouts* analitzats

Les dades referides a la dimensió, desnivell i grau de pendent mostrats per les 14 morfologies analitzades en aquest sistema es mostren a la Taula 21. La longitud mitjana en aquest cas queda fixada en 35.23 m. La màxima longitud la localitzem al BOA8, amb un total de 64.37 m. D'altra banda, la mínima es localitza al BOA5, amb 16.19 m.

Aquesta morfologia es troba localitzada entre els BOA 4 i 6, els quals es troben connectats entre sí en la seva part interior (Figura 90).

	Longitud (m)	Desnivell (m)	Pendent (%)
BOA1	28,18	3,61	12,81
BOA2	20,11	4,08	20,29
BOA3	45,52	9,11	20,01
BOA4	39,37	7,35	18,67
BOA5	16,19	2,42	14,95
BOA6	47,71	8,68	18,19
BOA7	26,14	5,80	22,19
BOA8	64,37	3,35	5,20
BOA9	33,86	6,18	18,25
BOA10	19,28	2,60	13,49
BOA11	26,00	5,40	20,77
BOA12	61,35	4,16	6,78
BOA13	29,26	6,41	21,91
BOA14	35,49	5,67	15,98
<b>Mitjana</b>	<b>35,20</b>	<b>5,34</b>	<b>16,39</b>

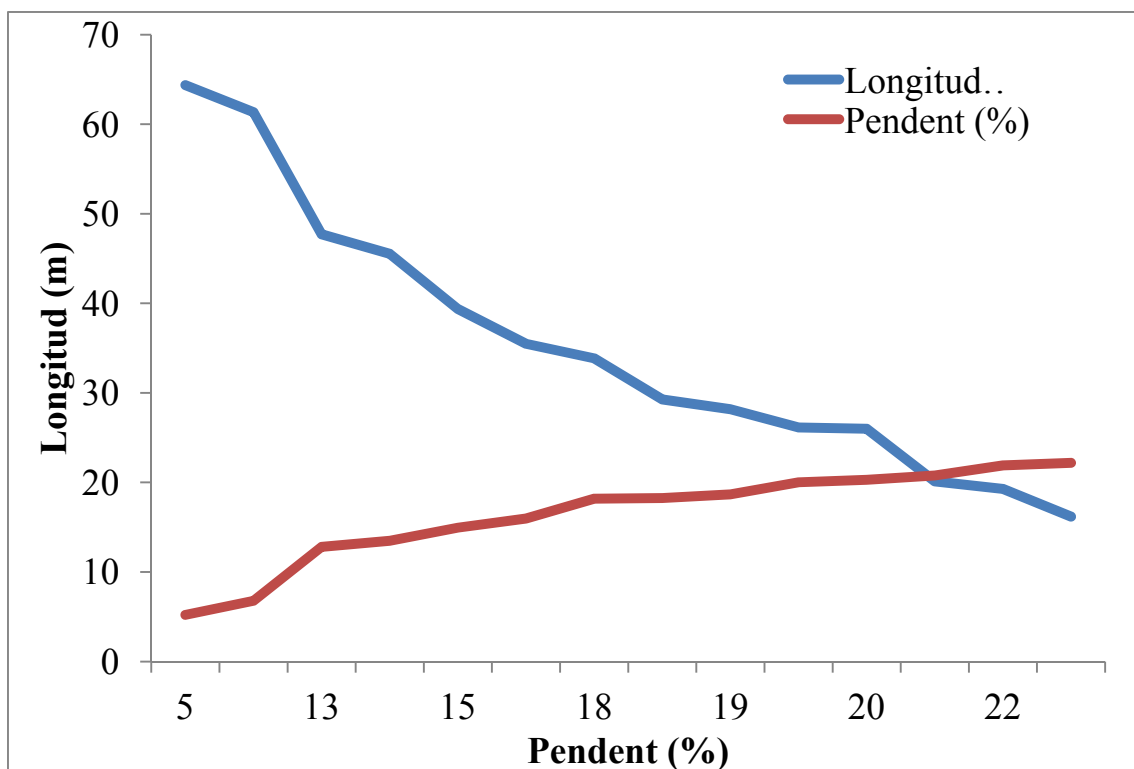
**Taula 21:** Pendent (%), longitud (m) i desnivell (m) per a cada una de les morfologies *blowout* analitzades a Cala Agulla. Les xifres remarcades en vermell representen els valors màxims de cada variable, mentre que les diferenciades en blau fan el referent a les mínimes.

Pel que fa a el pendent, la mitjana queda fixada en 16.39 %. El valor màxim es localitza al BOA7, amb el 22.19 %. No obstant, destacar també el pendent mostrat per altres punts de mostreig tals com el BOA3, BOA11 i BOA12, tots amb valors que es situen al voltant del 20 %. La mínima es troba al BOA8, sols amb el 5.20 %. Finalment, el desnivell mitjà de les 14 morfologies analitzades és de 5.34 m. En aquest cas el valor màxim s'identifica al BOA3, amb 9.11 m, mentre que el mínim es localitza al BOA5, sols amb 2.42 m.

En termes generals es torna a repetir la tendència mostrada per la relació entre longitud i pendent (tal i com ja es manifestava pel cas d'es Comú). Així sembla a ser que hi ha una relació negativa entre ambdues variables en el sentit que, a mesura que la longitud augmenta el grau de pendent disminueix. En aquest cas, tal i com es mostra a la Taula 21, l'exemple paradigmàtic del dit es troba al BOA8, el qual amb una longitud de 64.37 m (la màxima de la mostra) tan sols presenta un pendent del 5.20 % (la mínima de la mostra). Altres exemples que ens manifesten els mateixos patrons de relació en són per exemple el BOA12. D'altra banda, la situació contrària s'expressa en

que *blowouts* amb longituds menors presenten graus de pendent superiors; e.g. BOA5, amb una longitud de 16.19 m i un pendent del 14.95 % (Taula 21).

En termes de correlació entre les variables fins al moment esmentades en aquest cas, l'índex de Pearson mostra una correlació positiva entre la longitud i el desnivell, expressada en  $r = 0.29$ . No obstant, el valor és pròxim a 0 suggerint doncs que la correlació lineal entre ambdues no és del tot important. D'altra banda, la situació canvia si considerem la correlació entre la longitud i el pendent, expressada en aquest cas per  $r = 0.58$ . Així, la tendència mostrada per les morfologies analitzades mostra que quan una d'aquestes augmenta (longitud), l'altra disminueix (pendent). Aquesta tendència es mostra a la Figura 91 a on les longituds més elevades es relacionen amb graus de pendents baixos, i viceversa.



**Figura 91:** Gràfic de correlació entre la longitud i la pendent dels 14 *blowouts* caracteritzats a Cala Agulla.

#### 3.1.2.2.2. Orientació dels *blowouts*

En termes quantitius, 4 de les 14 morfologies *blowout* responen a una direcció NNE-SSO, representant el 28.5 %. D'altra banda altres orientacions tenen un pes

similar en termes percentuals, tals com NE-SO, ENE-OSO i E-O, cadascuna amb 3 morfologies, representant respectivament el 21.4 %. S'identifica una sola morfologia amb una orientació N-S, sols representant el 7.1 % de la mostra total (Taula 22). Pel que fa a la zona sud de la platja, més exposada als vents de component nord, la direcció predominant és NNE-SSO, mentre que a la part central hi predominen les direccions ENE-OSO. Així, i d'acord amb l'obertura estructural de la cala s'explica que les orientacions predominants siguin NNE-SSO i NE-SO (Figura 90). Finalment, l'orientació mitjana de les morfologies *blowouts* a Cala Agulla és de 47.9°, la qual es relaciona notablement amb l'obertura de la cala, amb una orientació E-O (Figura 90).

BO	Graus	Orientació
1	20	NNE-SSO
2	14	NNE-SSO
3	29	NNE-SSO
4	52	NE-SO
5	4	N-S
6	25	NNE-SSO
7	37	NE-SO
8	47	NE-SO
9	62	ENE-OSO
10	86	E-O
11	80	E-O
12	62	ENE-OSO
13	63	ENE-OSO
14	90	E-O

**Taula 22:** Orientació (expressada en °) de les 14 morfologies *blowout* analitzades al sistema de Cala Agulla (Mallorca). Aquesta taula es relaciona amb la informació gràfica mostrada per la Figura 90.

### 3.1.2.2.3. Morfometria i topografia interna

En termes generals l'amplada de les morfologies disminueix des de la seva boca cap a la seva part més interna. Aquesta tendència queda reflectida si es consideren els valors mitjans mostrats per T1= 17.76 m, T2= 12.53, i T3= 7.03 m (Taula 23), mostrant com les zones més erosionades es localitzen normalment a la boca del *blowout*. No



obstant també s'identifiquen algunes excepcions. Així, al BOA3 per exemple, l'amplada de T3 (10.79 m) és superior a la de T1 (3.40 m) i T2 (3.36 m) (Taula 23). Seguint el que postulen autors com Glenn (1979) o Carter et al. (1990) aquest fet es correspon amb la presència de zones deposicionals sedimentàries a la part posterior de les morfologies.

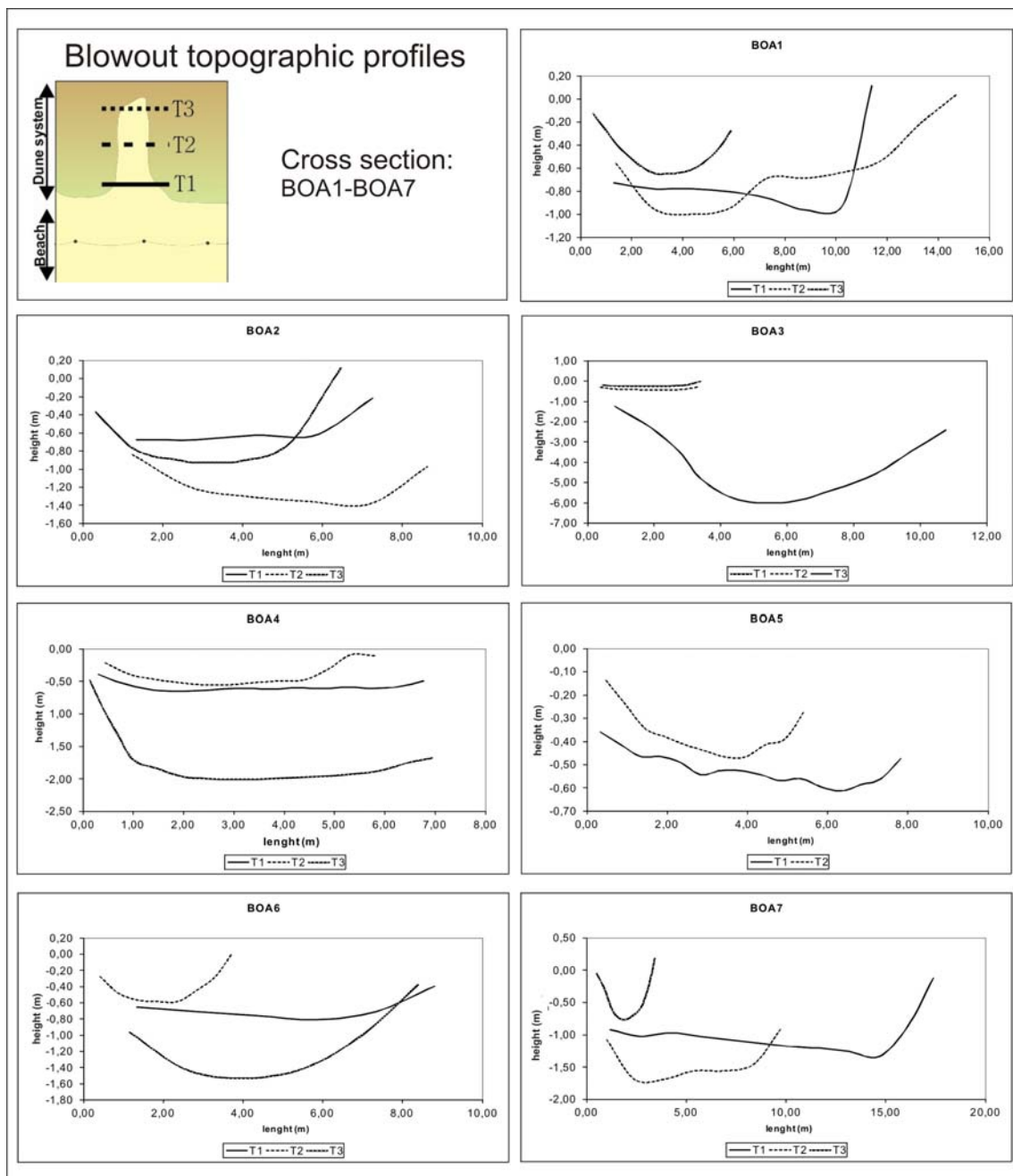
<b>Perfils topogràfics transversals (m)</b>			
	<b>T1</b>	<b>T2</b>	<b>T3</b>
BOA1	11,40	14,75	5,88
BOA2	7,28	8,64	6,47
BOA3	3,40	3,36	10,79
BOA4	6,77	5,83	6,94
BOA5	7,83	5,44	0,00
BOA6	8,81	3,73	8,38
BOA7	17,40	9,79	3,41
BOA8	41,80	35,07	10,90
BOA9	16,28	18,62	7,47
BOA10	13,12	4,03	4,22
BOA11	17,19	19,00	4,66
BOA12	63,47	31,12	13,25
BOA13	20,73	12,63	5,30
BOA14	13,19	3,38	10,79
<b>Mitjana</b>	<b>17,76</b>	<b>12,53</b>	<b>7,03</b>

**Taula 23:** Amplada de cada un dels perfils topogràfics transversals aixecats en els *blowouts* de Cala Agulla. En vermell apareixen els valors màxims, i en blau ho fan els valors mínims identificats en cada cas.

En el cas de T1 la màxima amplada, expressada amb 63.47 m, la trobem al BOA 12, mentre que la mínima es localitza al BOA3, amb 3.40 m. Pel que fa a T2, l'amplada màxima es situa al BOA8, amb 35.07 m, mentre que el valor mínim es localitza de nou al BOA3, amb 3.36 m. Finalment, en el cas de T3 el valor més alt es troba al BOA12, amb 13.25 m, mentre que en el cas de la mínima aquesta es situa al BOA6, amb sols 3.41 m (Taula 23 i Figura 92).

La morfologia interior adoptada pels diferents transsectes aixecats varia principalment en funció de la seva localització. En el cas de T1 presenten principalment superfícies uniformes, planes especialment en la seva part central, i amb un pendent suau en les seves parets laterals, tal i com mostren els BOA4, BOA8 i BOA14 (Figura 92 i 93). Una de les característiques d'aquesta primera secció és la presència de petits solcs de deflació en alguns casos, tals i com es mostren al BOA12, però també en els casos de BOA1, BOA7 i BOA11 (Figures 92 i 93). Hi ha una notable relació entre la presència d'aquests solcs i una major pendent en les parets laterals de les morfologies

en qüestió – aquest fet es percep, per exemple al BOA1 –. Algunes vegades la presència d'aquests solcs s'estenen de cap a l'interior, sent presents també a T2 (e.g. BOA2, 11 i 12). Finalment la topografia mostrada per T3 es caracteritza per la seva concavitat i perfils estrets, especialment a BOA11 i BOA7.



**Figura 92:** Perfils topogràfics de BOA 1, 2, 3, 4, 5, 6 i 7.

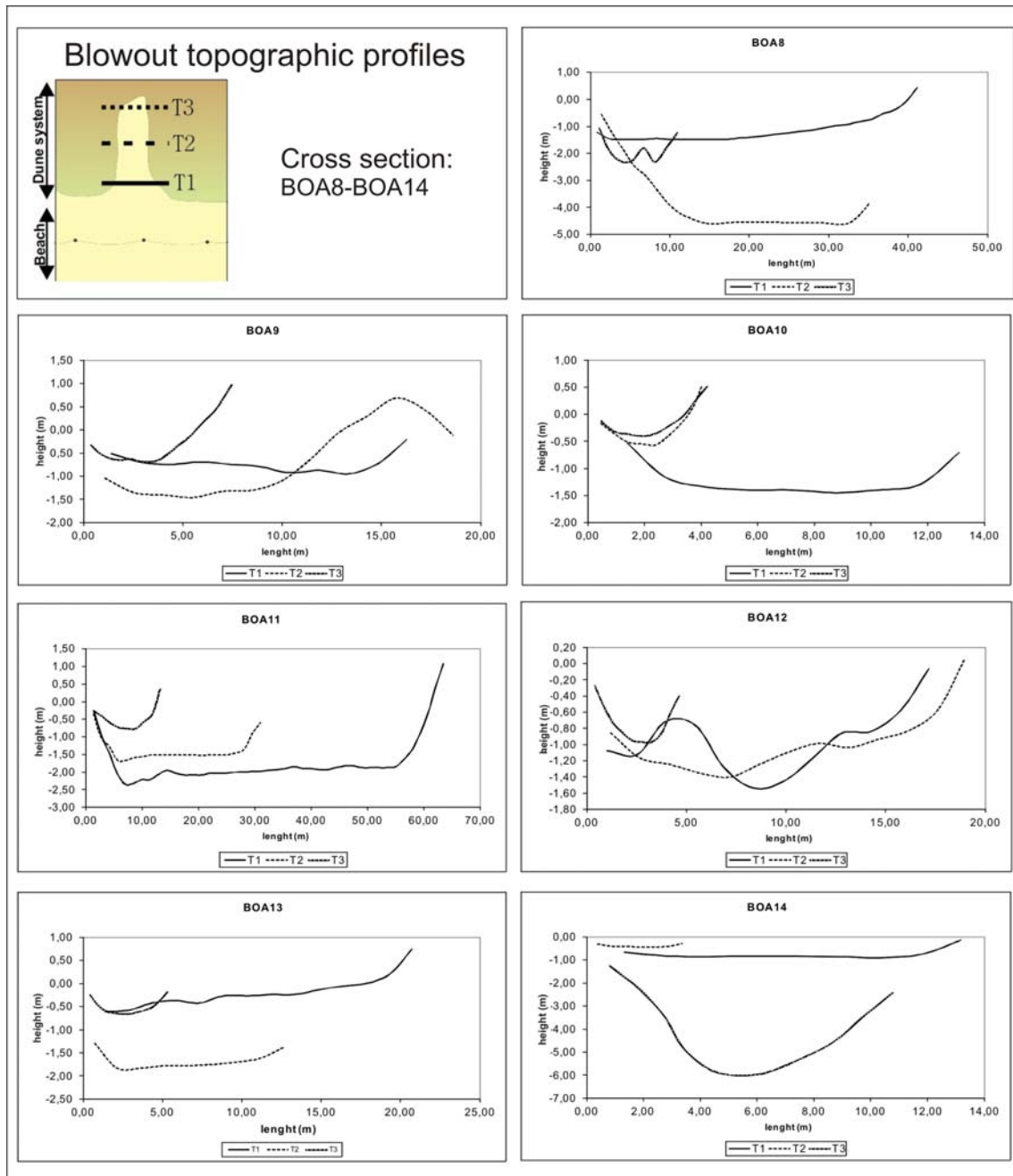


Figura 93: Perfils topogràfics de BOA 8, 9, 10, 11, 12, 13 i 14.

#### 3.1.2.2.4. Caracterització i model evolutiu de zones degradades

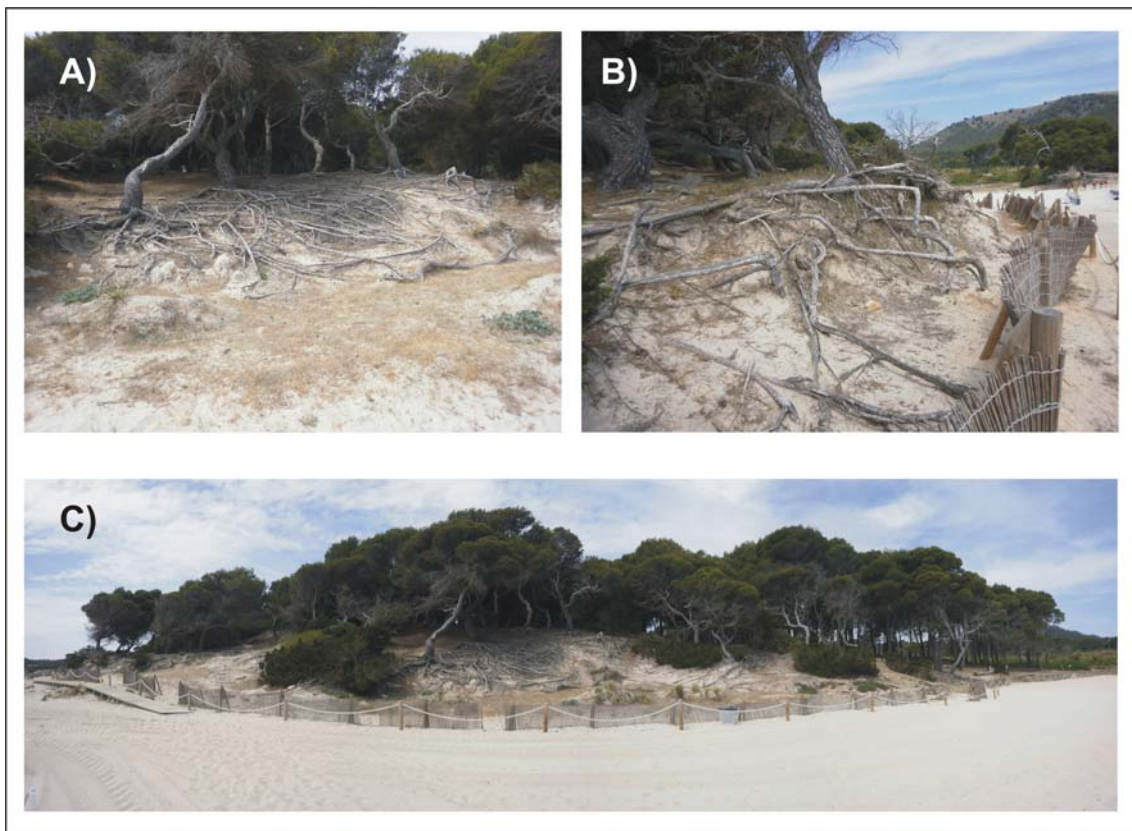
En el front dunar de Cala Agulla, a l'igual que succeïa en el cas d'es Comú de Muro (veure a l'epígraf 3.1.1.2.4.) el màxim grau de fragmentació no es pot associar a la presència de morfologies *blowout* simples o individuals, sinó a la presència del que denominem zones degradades (ZD) les quals, degut al seu alt grau de fragmentació se'n fa difícil la seva caracterització des d'un punt de vista geomorfològic i ecològic.

En aquest cas dues en podrien ser les zones catalogades com a tals, encara que es podrien fer algunes puntualitzacions. Pel que fa a la primera, aquesta es localitza entre els BOA7 i 8, a la part meridional de la platja. S'estén al llarg d'uns 40.5 m, i com es descriuen les ZD3 i 4 d'es Comú de Muro, es caracteritza per un gran nombre de disruptions al llarg del seu front (Figura 94). Aquest escenari ha derivat amb un retrocés generalitzat del front de duna de cap a l'interior del sistema, veient-se principalment dominat per processos d'erosió. Les conseqüències de tal tendència passen per un estat geomorfològic molt afectat, caracteritzat principalment per l'existència de vestigis de les dunes originàries, i per una alteració important de les seves característiques ecològiques. En aquest cas, les mesures de gestió preses al llarg dels darrers anys – e.g. cordó de protecció, establiment de trampes d'interferència eòlica – han derivat amb una incipient proliferació de vegetació herbàcia, sent avui la que predomina, per sobre de la vegetació arbustiva. D'aquí doncs, també en resulta l'existència de morfologies arenoses incipients tals com *echo dunes* o *shadow dunes*.



**Figura 94:** Imatges panoràmiques de la primera ZD identificada a Cala Agulla. A la imatge superior (A) s'identifiquen, amb vistes des de la platja alta, les disruptions existents en la primera línia, avui mostrant un elevat grau de fragmentació, mentre que a la imatge inferior (B) es veu l'estat erosiu mostrat en segona línia.

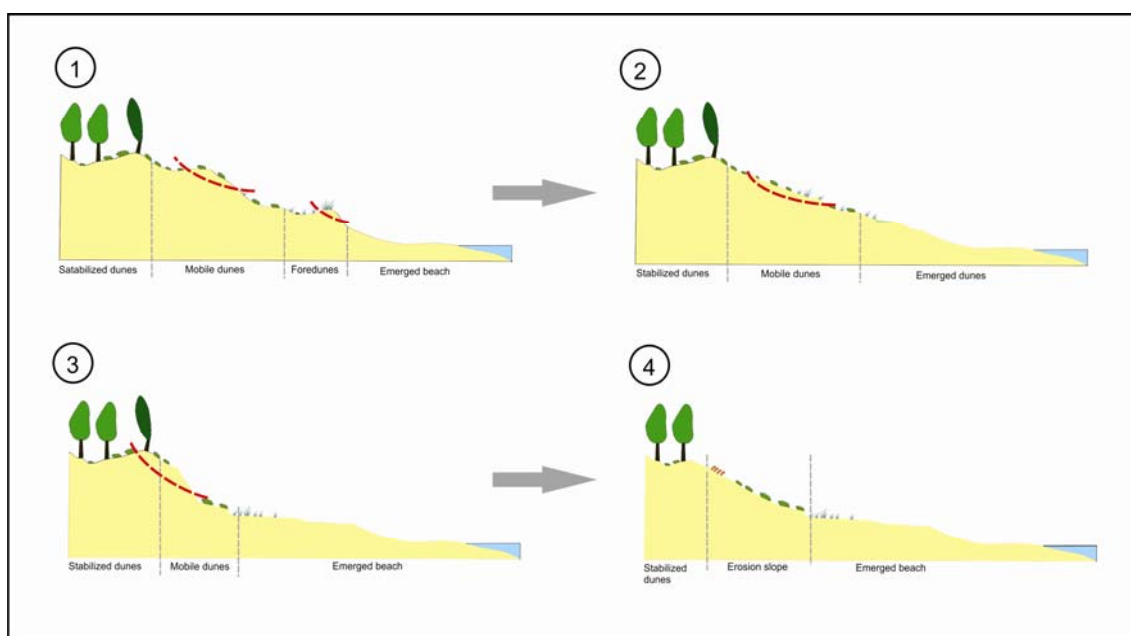
La segona zona, localitzada al nord de la platja, es troba controlada principalment per processos erosius (Figura 95), no obstant amb característiques distintes a les ZD fins ara descrites, endemés de seguir patrons evolutius també diferents. Aquesta segona àrea s'estén al llarg d'uns 40 m de longitud i ocupada una superfície que es mou al voltant dels 180 m<sup>2</sup>. No obstant, actualment és una de les zones de la platja a on millor es percep l'erosió soferta per la primera línia del sistema dunar. El fet distintiu en aquest cas és que els patrons d'erosió no passen per la presència de *blowouts*, sinó per un retorçes generalitzat de la primera línia de duna (Figura 95).



**Figura 95:** Imatges de la segona àrea altament degradada al llarg del front de dunes de Cala Agulla.

La situació mostrada actualment indueix a pensar que el retorçes gradual sofert per aquesta zona ha tengut principalment dos efectes prou visibles avui dia. En primer lloc s'ha generat una important alteració del perfil originari existent entre la part superior de la platja alta i la primera línia de dunes (Figura 96). En segon lloc, i derivant-se del punt anterior, s'ha produït una alteració ecològica prou visible la qual localitza en primera línia de duna la presència de vegetació arbòria manifestada per la presència de *P. halepensis*, gens comú en els sistemes platja-duna de les Balears (Figura 95A i B). Endemés dels dos punts comentats es perceben altres signes que evidencien

clarament els procés de retrocés que el front dunar ha sofert en aquest cas. Així, la important presència d'afloraments d'arrels de *P. halepensis* (Figura 95B) o bé d'eolinites fòssils posen de manifest aquesta tendència negativa. Com a resultat del procés evolutiu sofert en aquest cas al llarg del temps, actualment no existeix cap transició geomorfològica ni ecològica – sobretot si es pensa en el perfil típic dels sistemes platja-duna a les Illes Balears; veure Figura 8 de l'epígraf 1.5.1) – entre el límit superior de la platja emergida i la primera línia de duna (Figura 96).



**Figura 96:** Model evolutiu proposat per a la segona ZD en el cas de Cala Agulla. La desaparició de la primera línia de duna o *foredune* ha induït a un retrocés generalitzat del front dunar que, dominat per processos erosius ha suposat la pèrdua del perfil topogràfic i ecològic originari.

### 3.1.2.2.5. Classificació morfològica

Considerant la morfologia adoptada, un total de 5 categories es poden diferenciar en tant a les 14 morfologies presentades al llarg del front dunar de Cala Agulla (Figura 97); els predominants són els *trough blowout*, representant el 50% del total. A continuació, i seguint l'ordre segons el pes que representen, es troben les formes mixtes – *mixed shape* –, els *conical blowout* i els *bitten blowout*, cada categoria representant el 14.29 % respectivament. Finalment s'identifica un *saucer blowout*, tan sols representant el 7.14 % sobre la mostra total. Pel que fa a l'estructura que aquests presenten cal diferenciar entre dues categories (Figura 97, inferior); els *blowouts* simples, representant el 78.57 %, i els ramificats o *branched*, amb un 21.43 %.

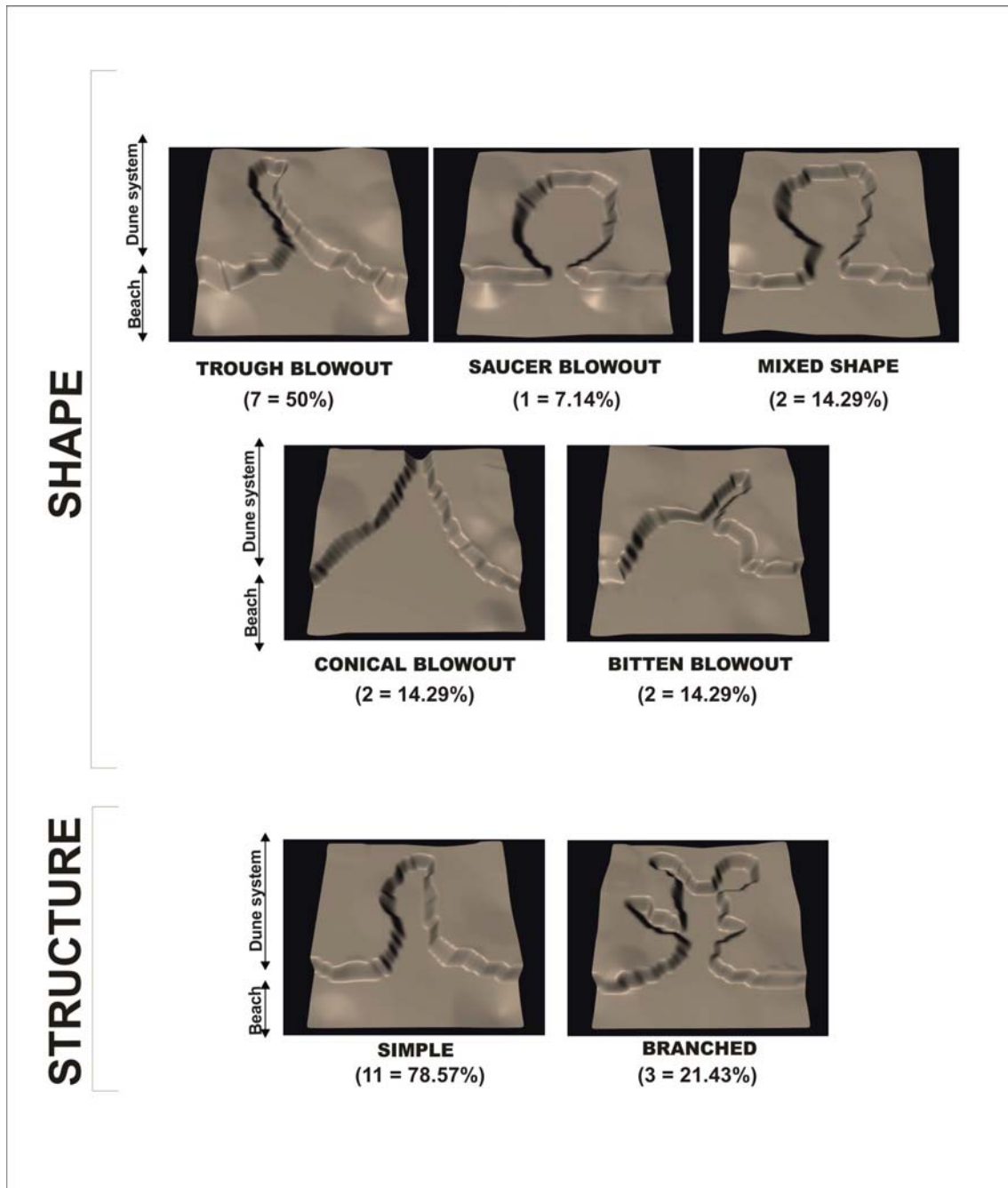


Figura 97: Classificació morfològica de les morfologies *blowout* al sistema de Cala Agulla.

Les morfologies *trough blowout* són normalment més allargades que les altres tipologies, mostrant canals de deflació més profunds, i amb un major pendent en les seves parets laterals. D'altra banda, els *saucer blowouts* es presenten en formes circulars o semi-circulars, i normalment es desenvolupen en superfícies més planes, poc profundes. Les formes mixtes – *mixed shapes* – esdevenen la combinació de les dues tipologies descrites anteriorment. Així, es desenvolupen a partir d'una morfologia *trough*, que comença en primera línia de duna i que s'estén cap endins, i acaben, en la

seva part interior amb morfologies semi-circulars – *saucer* – corresponent-se amb la presència de lòbuls de deposició. Les morfologies en forma cònica – *conical blowouts* – (veure BOA8 i 12 a la Figura 90) es presenten com a tipologia pròpiament característica d'aquest sistema, ja que no s'han identificat en els altres sistemes estudiats. Aquests dibuixen un forma cònica caracteritzada per una notable amplada en la seva boca la qual decreix gradualment a mesura que s'endinsen dins el sistema de dunes. Aquests *blowouts* – concretament aquests dos *blowouts* – es troben associats als dos accessos principals a la platja des de l'interior del sistema dunar consolidat. Els *bitten blowouts* es desenvolupen terra endins a partir de “mossegades” existents a la primera línia de duna, les quals determinaran la seva evolució. Finalment, i pel que fa a l'estructura, les morfologies simples es caracteritzen sols per la presència d'un únic canal de deflació, el qual s'estèn terra endins des de la primera duna, mentre que els *blowouts* ramificats – *branched* – contempen diverses canals, cada un d'elles amb diferents direccions i incrementant el risc de; 1) juntar-se amb altres *blowouts* limítrofes, i 2) incrementar l'estat de degradació (Figura 97, inferior).

L'aplicació de l'índex *iTx* en el cas de Cala Agulla (Taula 24) permet establir la classificació morfològica de les morfologies estudiades a partir de la relació existent entre els diferents perfils topogràfic transversals (T1, T2 i T3) i la longitud de la morfologia en qüestió. De la seva aplicació es veu com els patrons de distribució morfològica són els mateixos i es corresponen a la classificació visual feta a partir de l'anàlisi fotomètrica (Figura 97).

En efecte els *trough blowouts* es presenten en formes més allargades i estretes, i amb patrons que es caracteritzen per disminuir les seves dimensions a mesura que es desenvolupen de cap a l'interior. Tal i com reflecteixen la Taula 24 i la Figura 98 però, cal distingir entre dues sub-tipologies amb patrons lleugerament diferents. Així diferencial els *trough blowouts A*, amb valors de  $iT_1 = 0.41$ ,  $iT_2 = 0.43$ ,  $iT_3 = 0.18$ . Aquests esdeven més amples en el seu conjunt, inclús en la seva part central (T2) equiparant-se a l'amplada que tenen a la boca (T1), o lleugerament superior. No obstant, la morfologia que presenten és allargada. D'altra banda es poden diferenciar els *trough blowouts B* ( $iT_1 = 0.23$ ,  $iT_2 = 0.21$ ,  $iT_3 = 0.18$ ). En aquest cas presenten les morfologies pròpies d'aquesta tipologia, dibuixant formes talment allargades i estretes que, amb amplades més o manco homogènies, es desenvolupen de cap a l'interior.



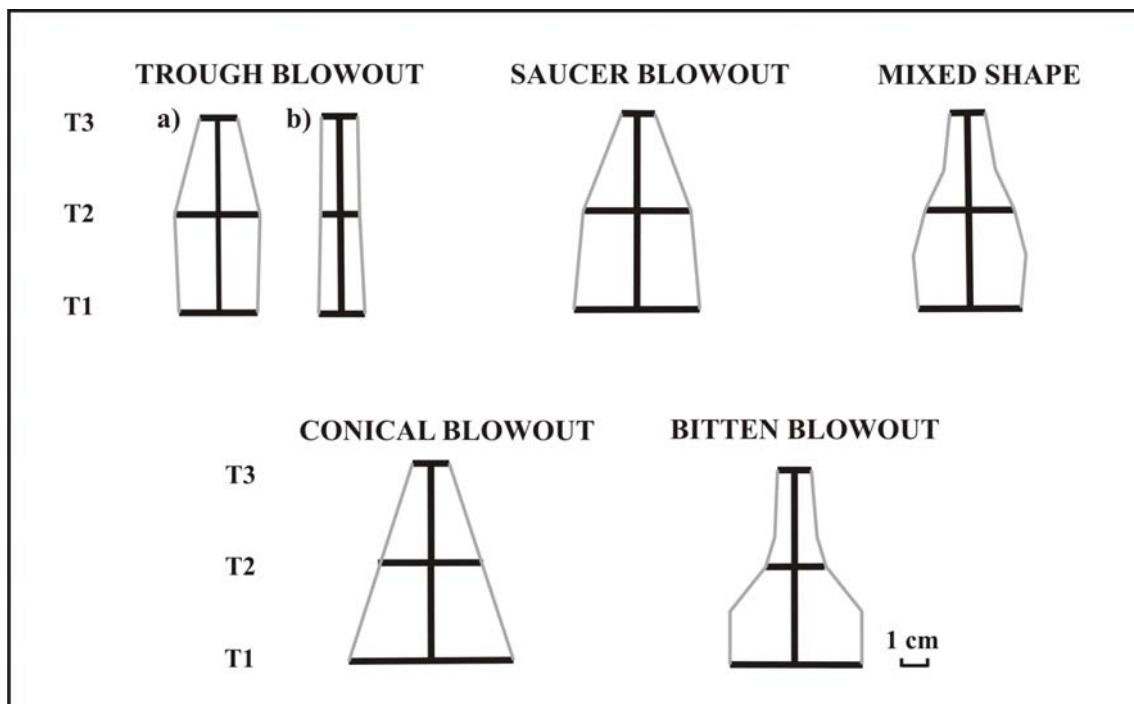
		Lenght (m)	iT1	iT2	iT3	iA	
Trough BO	BOA1	28,18	0,40	0,52	0,21	A	
	BOA2	20,11	0,36	0,43	0,32		
	BOA5	16,19	0,46	0,34	0,00		
		<b>Mean</b>	<b>21,49</b>	<b>0,41</b>	<b>0,43</b>	<b>0,18</b>	<b>0,34</b>
	BOA3	45,52	0,07	0,07	0,24	B	
	BOA4	39,37	0,17	0,15	0,18		
	BOA6	47,71	0,18	0,08	0,18		
BOA13	35,49	0,48	0,54	0,13			
	<b>Mean</b>	<b>42,02</b>	<b>0,23</b>	<b>0,21</b>	<b>0,18</b>	<b>0,21</b>	
Saucer BO	BOA9	64,37	0,64	0,54	0,17		
	<b>Mean</b>	<b>64,37</b>	<b>0,64</b>	<b>0,54</b>	<b>0,17</b>	<b>0,45</b>	
Mixed shape	BOA10	33,86	0,48	0,55	0,22		
	BOA14	35,61	0,58	0,35	0,15		
	<b>Mean</b>	<b>34,74</b>	<b>0,53</b>	<b>0,45</b>	<b>0,18</b>	<b>0,39</b>	
Conical BO	BOA8	64,37	0,64	0,54	0,17		
	BOA12	61,35	1,03	0,51	0,22		
	<b>Mean</b>	<b>62,86</b>	<b>0,84</b>	<b>0,53</b>	<b>0,19</b>	<b>0,52</b>	
Bitten BO	BOA7	26,14	0,67	0,37	0,13		
	BOA11	19,28	0,68	0,21	0,22		
	<b>Mean</b>	<b>22,71</b>	<b>0,67</b>	<b>0,29</b>	<b>0,17</b>	<b>0,38</b>	

**Taula 24:** Classificació morfològica a partir de l'aplicació de l'índex  $iTx$  (veure'l a l'apartat 2.2.5.).

Els *saucer blowouts* es caracteritzen per unes dimensions considerables en la seva boca T1 ( $iT_1 = 0.64$ ) i part central T2 ( $iT_2 = 0.54$ ), mentre que aquesta disminueix a la part interior T3 ( $iT_3 = 0.17$ ) esdevenint tot plegat formes semi-circulars. Les formes mixtes – *mixed shapes* – presenten patrons morfològics similars, tot i que amb algunes diferències, sobretot entre T1 i T2, amb una menor diferència en tant a l'amplada dels dos perfils ( $iT_1 = 0.53$ ,  $iT_2 = 0.45$ ,  $iT_3 = 0.18$ ). Es demostra també que els *bitten blowouts* es caracteritzen per una amplada considerada a la seva boca ( $iT_1 = 0.67$ ) i unes dimensions que decreixen de cap al seu interior ( $iT_2 = 0.29$  and  $iT_3 = 0.17$ ). Finalment, els *conical blowouts* presenten una amplada molt considerables a la seva boca ( $iT_1 = 0.84$ ), la qual, de manera gradual, va disminuint de cap a l'interior dibuixant la seva característica forma ( $iT_2 = 0.53$ ,  $iT_3 = 0.19$ ).

A partir de l'aplicació de l'índex  $iA$  (explicat a l'epígraf 2.2.5.), les dimensions estandarditzades mostrades per a cada una de les tipologies descrites a partir de valors quantitatius indiquen que els *conical blowouts* són els que presenten una major superfície, amb  $iA = 0.52$ . A continuació, amb valors lleugerament inferiors es troben

els *saucer blowouts*, amb  $iA = 0.45$ . Els *trough blowouts* són els que presenten les menors dimensions, sobretot la tipologia B, amb  $iA = 0.21$ . Finalment, amb valors entremetjats i similars entre ells es distingeixen els *trough blowouts A* ( $iA = 0.34$ ), els *bitten blowouts* ( $iA = 0.38$ ) i les formes mixtes ( $iA = 0.39$ ).



**Figura 98:** Representació esquemàtica a escala de la classificació morfològica a partir de l'aplicació de l'índex  $iTx$  (relacionada amb la Taula 24).

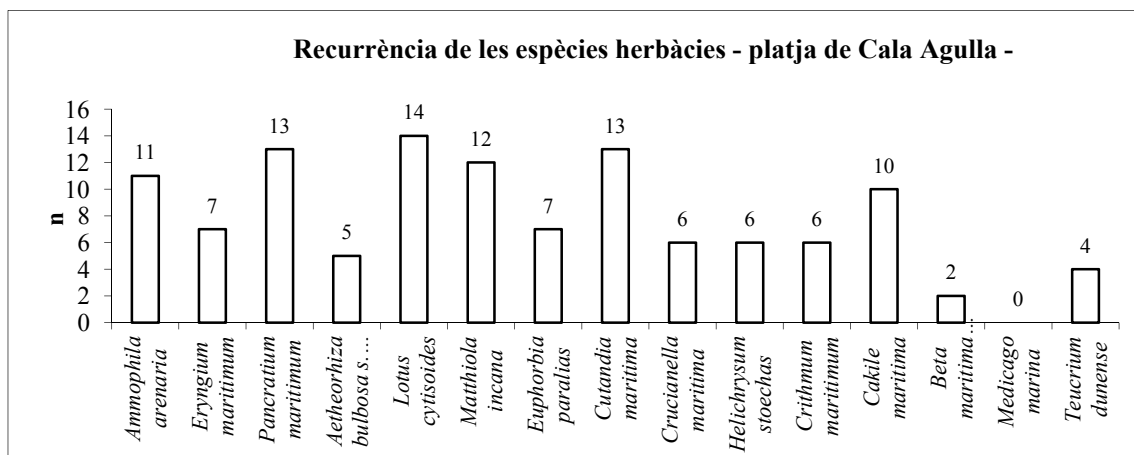
#### 3.1.2.2.6. Inventaris florístics i caracterització taxonòmica del front dunar

Dels inventaris florístics realitzats en el cas de Cala Agulla també es diferencia clarament entre dos grups; vegetació de característiques herbàcies, i vegetació amb característiques llenyoses o arbustives. El primer cas és el que es presenta com a més nombrós, amb un total de 15 espècies principals (Taula 25) identificades al llarg dels 14 *blowouts* mostrejats. No obstant, cada una d'elles presenta patrons diferents de distribució i importància, mesurada a partir de la seva presència i recurrència. Un primer grup, format per *Lotus cytisoides* (93.33%), *Pancratium maritimum* i *Cutandia maritima* (86.67%), *Matthiola incana* (80%), *Ammophila arenaria* (73.33%) i *Cakile maritima* (66.67%) és el que es forma per les espècies més recurrents, totes amb un

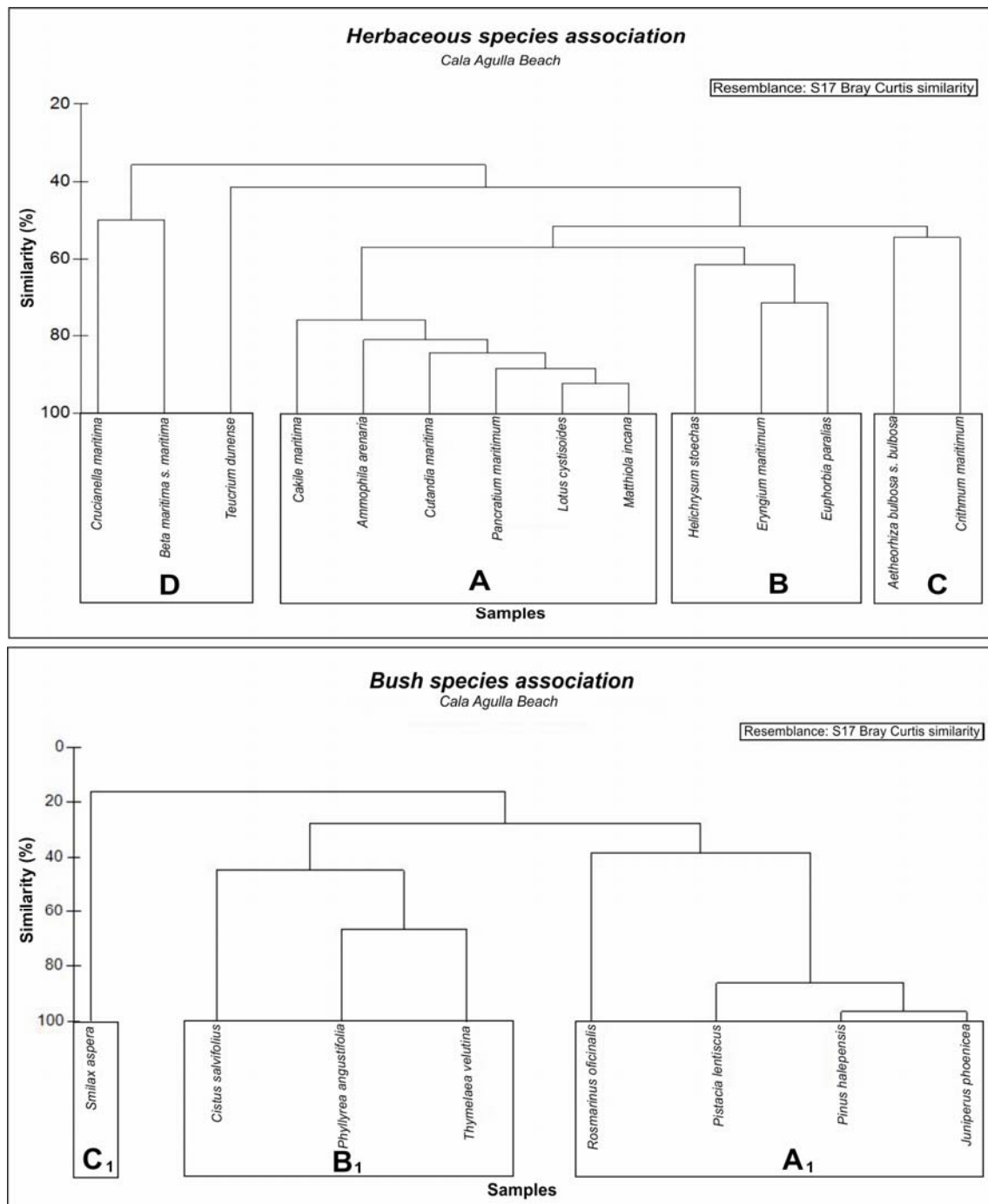
ordre de presència superior als 10 *blowouts*. Un segon grup es forma per espècies que tenen presència entre  $5 < n < 10$  tals com *Eryngium maritimum* (46.67%), *Aetheorhiza bulbosa* subs. *bulbosa* (33.33%), *Euphorbia paralias* (46.67%) o *Crucianella maritima*, *Helichrysum stoechas* i *Crithmum maritimum* (40%). Finalment es troben espècies amb una baixa presència ( $n < 5$ ) com *Teucrium dunense* (26.67%) o *Beta maritima* subs. *maritima* (13.33%) (Taula 25 i Figura 99).

Espècies herbàcies	Total	%
<i>Ammophila arenaria</i>	11	73,33
<i>Eryngium maritimum</i>	7	46,67
<i>Pancreatium maritimum</i>	13	86,67
<i>Aetheorhiza bulbosa</i> subs. <i>bulbosa</i>	5	33,33
<i>Lotus cytisoides</i>	14	93,33
<i>Matthiola incana</i>	12	80,00
<i>Euphorbia paralias</i>	7	46,67
<i>Cutandia maritima</i>	13	86,67
<i>Crucianella maritima</i>	6	40,00
<i>Helichrysum stoechas</i>	6	40,00
<i>Crithmum maritimum</i>	6	40,00
<i>Cakile maritima</i>	10	66,67
<i>Beta maritima</i> subs. <i>maritima</i>	2	13,33
<i>Medicago marina</i>	0	0,00
<i>Teucrium dunense</i>	4	26,67

**Taula 25:** Espècies herbàcies identificades al llarg dels 14 *blowouts* analitzats a Cala Agulla. Es mostra la seva recurrència en termes absoluts i percentuals sobre el total de la mostra.



**Figura 99:** Recurrència i importància – en termes absoluts – de les espècies herbàcies al llarg de les formes erosives *blowout* a Cala Agulla.



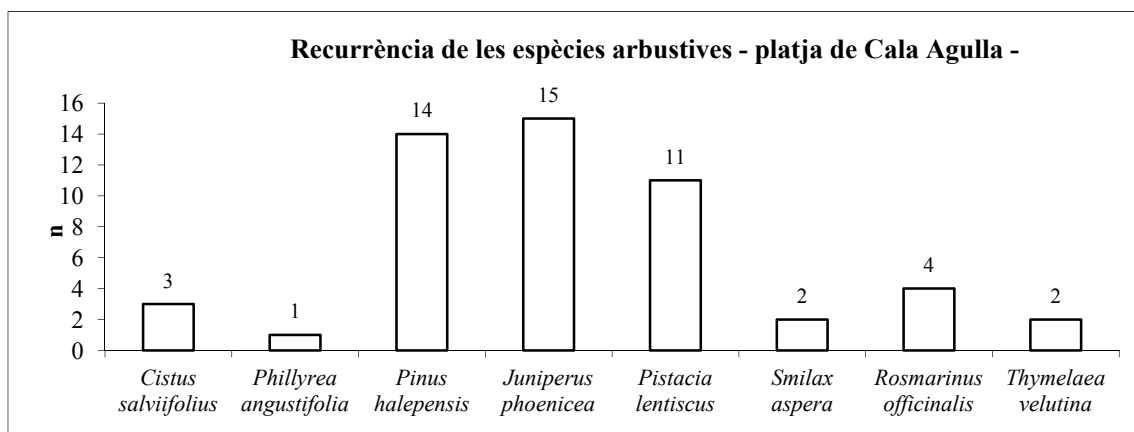
**Figura 100:** Agrupacions de les espècies vegetals identificades i mostrejades al front dunar de Cala Agulla a partir de la seva presència/absència en cada una de les morfologies. Les anàlisis *clusters* o dendrogrames han estat realitzades a partir de l'índex *Bray Curtis similarity*. A la part superior (A) es mostren les agrupacions derivades de les espècies herbàcies existents, mentre que a la part inferior de la imatge (B) es fa el propi amb el cas de les espècies llenyoses o arbustives.

Distintes associacions d'espècies es poden identificar a partir de considerar els seus patrons de presència / absència, diferenciant-se entre elles pel grau de similitud mostrat. En el cas de les espècies herbàcies (Figura 100, superior) es distingeixen un total de 4 associacions. El primer grup (A), format per *Cakile maritima*, *Ammophila*

*arenaria*, *Cutandia maritima*, *Pancretium maritimum*, *Lotus cytisoides* i *Matthiola incana* mostra un grau d'associació força important el qual oscil·la entre el 80-90%. Un segon grup (B), format per tres espècies; *Helichrysum stoechas*, *Eryngium maritimum* i *Euphorbia paralias* s'identifica per un grau de similitud entre el 60-70%. Aquest segon grup es relaciona amb el primer amb un grau de similitud proper al 60%. Finalment, s'identifiquen dues associacions independents manco importants, caracteritzades per graus de similitud menors. Així, el grup C està format per *Aetheorhiza bulbosa* subs. *bulbosa* i *Crithmum maritimum*, ambdues amb un grau d'associació del 60%, mentre que un quart grup (D), compost per *Beta maritima* subs. *maritima* i *Cruacianella maritima*, mostra valors d'associació inferiors al 40%.

Espècies arbustives	Total	%
<i>Cistus salviifolius</i>	3	20,00
<i>Phillyrea angustifolia</i>	1	6,67
<i>Pinus halepensis</i>	14	93,33
<i>Juniperus phoenicea</i>	15	100,00
<i>Pistacia lentiscus</i>	11	73,33
<i>Smilax aspera</i>	2	13,33
<i>Rosmarinus officinalis</i>	4	26,67
<i>Thymelaea velutina</i>	2	13,33

**Taula 26:** Espècies llenyoses identificades al llarg dels 14 *blowouts* analitzats a Cala Agulla. Es mostra la seva recurrència en termes absoluts i percentuals sobre el total de la mostra.

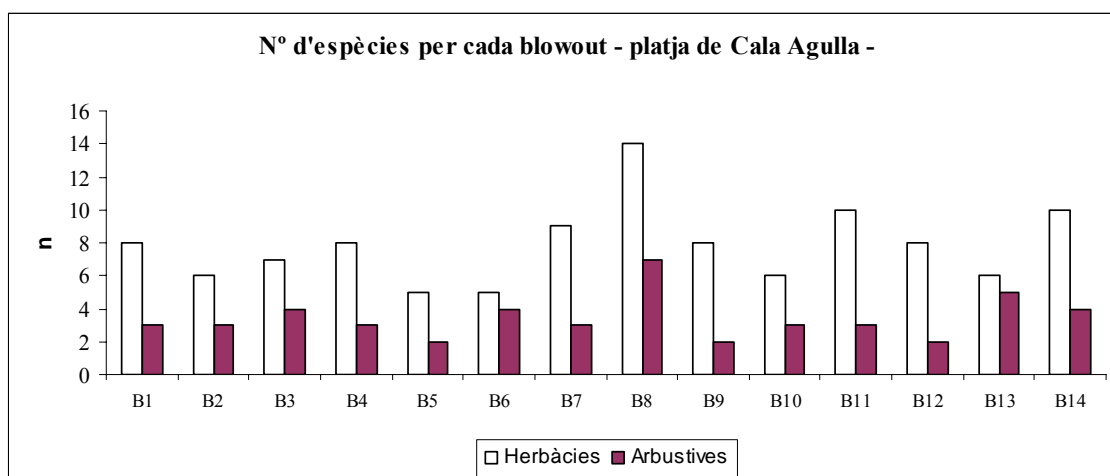


**Figura 101:** Recurrència i importància – en termes absoluts – de les espècies llenyoses al llarg de les formes erosives *blowout* a Cala Agulla.

Pel que fa a les espècies de característiques llenyoses/arbustives aquestes mostren una menor varietat, amb un total de 8 espècies principals. En termes absoluts es poden distingir 2 grups; el primer es caracteritza per ordres de presència força elevats. Està

format per 3 espècies com són *Juniperus phoenicea* (100%), *Pinus halepensis* (93%) i *Pistacia lentiscus* (73.33%), presents totes elles en més de 10 *blowouts* (Taula 26 i Figura 101). Un segon grup està format per les 5 espècies restants, les quals es troben presents a  $n < 5$ . Aquestes són *Rosmarinus officinalis* (26.67%), *Cistus salvifolius* (20%), *Smilax aspera* and *Thymelaea velutina* (13.33%), i *Phillyrea angustifolia* (6.67%).

El menor nombre d'espècies en aquest cas fa també que la situació en tant a les associacions mostrada sigui més simple que en el cas anterior, tal i com mostra la Figura 100 – inferior –. Es diferencien un total de 3 grups. Un primer grup ( $A_1$ ) inclou *Juniperus phoenicea*, *Pinus halepensis* i *Pistacia lentiscus*, les quals presenten entre elles patrons de similitud notables, oscil·lant entre el 80-100%. Un segon grup ( $B_1$ ) està format per *Cistus salvifolius*, *Thymelaea velutina* i *Phillyrea angustifolia*, mostrant valors d'associació inferiors d'entre el 40-60%. Finalment s'identifica un tercer grup ( $C_1$ ), format sols per *Smilax aspera*, la qual queda força deslligada de la resta d'espècies deguda a la seva escassa presència (Figura 100, inferior), mostrant valors de similitud inferiors al 20 %.



**Figura 102:** Representació gràfica de les diferències existents entre el número d'espècies herbàcies i llenyoses identificades per a cada un dels 14 *blowouts* al sistema de Cala Agulla.

Com ha quedat manifest, hi ha una clara i generalitzada predominança del nombre d'espècies herbàcies identificades en cada un dels *blowouts* per sobre, en aquest cas, de les que presenten característiques llenyoses (Figura 102). Remarcar de nou però, que les diferències no tan sols es donen en tant a la recurrència de les espècies, sinó també entre la presència de diferents espècies entre els punts de mostreig. Així doncs es poden observar *blowouts* amb menor diversitat (e.g. BOA5; 5 espècies herbàcies i 2 espècies

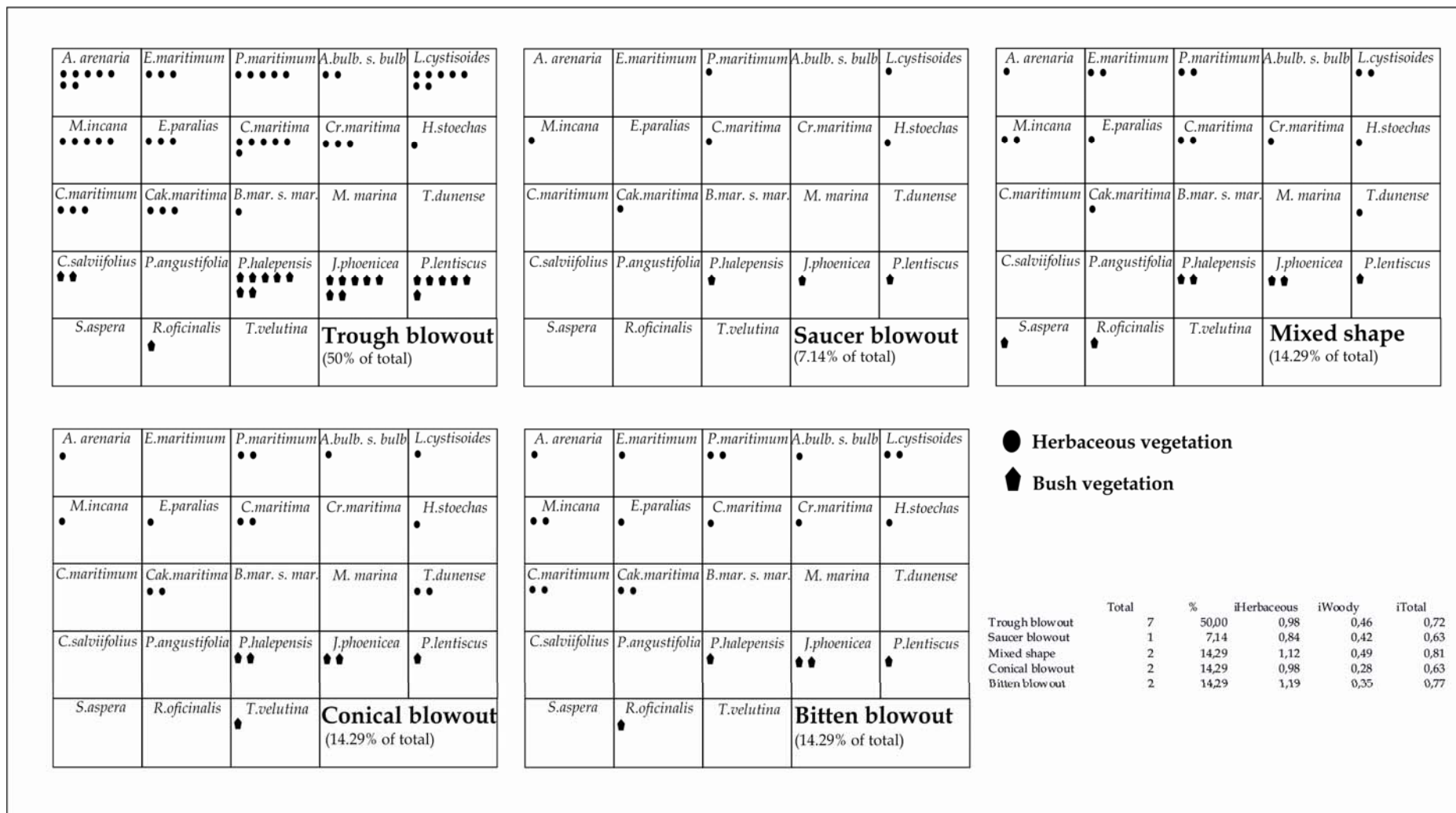
lleyoses) i d'altres a on aquesta és superior (e.g. BOA8; 14 espècies herbàcies i 7 espècies lleyoses).

#### 3.1.2.2.7. Patrons de relació botànica-geomorfològica

De nou, si considerem el nivell de presència que les distintes espècies vegetals identificades tenen vers les diferents tipologies de *blowouts* anteriorment definides es perceben diferències a considerar. Si es considera la presència que aquestes mostren en termes absoluts, tal i com es representa gràficament a la Figura 103, es pot percebre com les morfologies *trough blowout* són les que major presència de vegetació tenen, sobretot si ens centrem en el cas de les herbàcies.

Tanmateix, però, no és del tot objectiu fer la comparació si en aquest cas parlem en termes absoluts, ja que les diferències percentuals que cada una de les tipologies tenen vers al total de la mostra (n= 14) és força diferent (Figura 97). En aquest cas, la clara predominança de vegetació sobre els *trough blowouts*, anteriorment esmentada, s'explicaria pel major grau de presència que aquests tenen sobre la mostra total, expressada en un 50%.

Amb l'objectiu d'estandarditzar la relació tipologia-vegetació s'aplica l'índex  $R_{t-v}$ , el qual en valors 0-1 ens permeten saber el pes real que la presència de vegetació té en cada un dels casos. En termes generals es poden observar algunes diferències a comentar. Les espècies herbàcies mostren el seu màxim de relació amb les formes mixtes ( $R_{t-v}= 0.679$ ), mentre que la mínima presència la contempla en el cas dels *saucer blowouts* ( $R_{t-v}= 0.429$ ). Dintre de les herbàcies hi ha algunes espècies que mostren valors força elevants (propers a 1) en cada una de les distintes tipologies, suggerint la seva estreta relació amb cada una d'elles; e.g. *Pancratium maritimum*, *Lotus cytisoides* o *Cakile maritima*. En detriment algunes com *Aetheorhiza bulbosa* subs. *bulbosa* o *Beta maritima* mostren la situació contrària, amb valors de relació força baixos (propers a 0) (Taula 27). Finalment, d'altres com *Teucrium dunense* mostren una relació absoluta amb algunes tipologies, tals com les formes mixtes o els *conical blowout* ( $R_{t-v}= 1$ ), mentre que d'altra banda, no es relacionen de cap manera amb les tipologies *trough*, *saucer* o *bitten blowout*, amb valors de  $R_{t-v}= 0$ .



**Figura 103:** Representació gràfica del pes que cada una de les espècies – en termes absoluts – presenten en les diferents tipologies existents al llarg dels *blowouts* a Cala Agulla. En aquest cas el número de punts associats a cada espècie representa la seva presència vers a cada una de les tipologies.



	Trough BO	Saucer BO	Mixed shape	Conical BO	Bitten BO
% among total	50%	7,14%	14,29%	14,29%	14,29%
<i>Ammophila arenaria</i>	1	0	0,5	0,5	0,5
<i>Eryngium maritimum</i>	0,43	0	1	0	0,5
<i>Pancratium maritimum</i>	0,75	1	1	1	1
<i>Aetheorhiza bulbosa subs. bulbosa</i>	0,3	0	0	0,5	0,5
<i>Lotus cytisoides</i>	1	1	1	0,5	1
<i>Matthiola incana</i>	0,75	1	0,5	0,5	1
<i>Euphorbia paralias</i>	0,43	0	1	0,5	0,5
<i>Cutandia maritima</i>	0,85	1	0,5	1	0,5
<i>Crucianella maritima</i>	0,43	0	1	0	0,5
<i>Helichrysum stoechas</i>	0,14	1	1	0,5	0,5
<i>Crithmum maritimum</i>	0,43	0	0	0	1
<i>Cakile maritima</i>	0,43	1	1	1	1
<i>Beta maritima subs. maritima</i>	0,14	0	0	0	0
<i>Teucrium dunense</i>	0	0	1	1	0
<b>Herbaceous - tipologies</b>	<b>0,506</b>	<b>0,429</b>	<b>0,679</b>	<b>0,500</b>	<b>0,607</b>
<i>Cistus salvifolius</i>	0,3	0	0	0	0
<i>Phillyrea angustifolia</i>	0	0	0	0	0
<i>Pinus halepensis</i>	1	1	1	1	0,5
<i>Juniperus phoenicea</i>	1	1	1	1	1
<i>Pistacia lentiscus</i>	0,85	1	0,5	0,5	0,5
<i>Smilax aspera</i>	0	0	0,5	0	0
<i>Rosmarinus officinalis</i>	0,14	0	0,5	0	0,5
<i>Thymelaea velutina</i>	0	0	0	0,5	0
<b>Woody - tipologies</b>	<b>0,411</b>	<b>0,375</b>	<b>0,438</b>	<b>0,375</b>	<b>0,313</b>

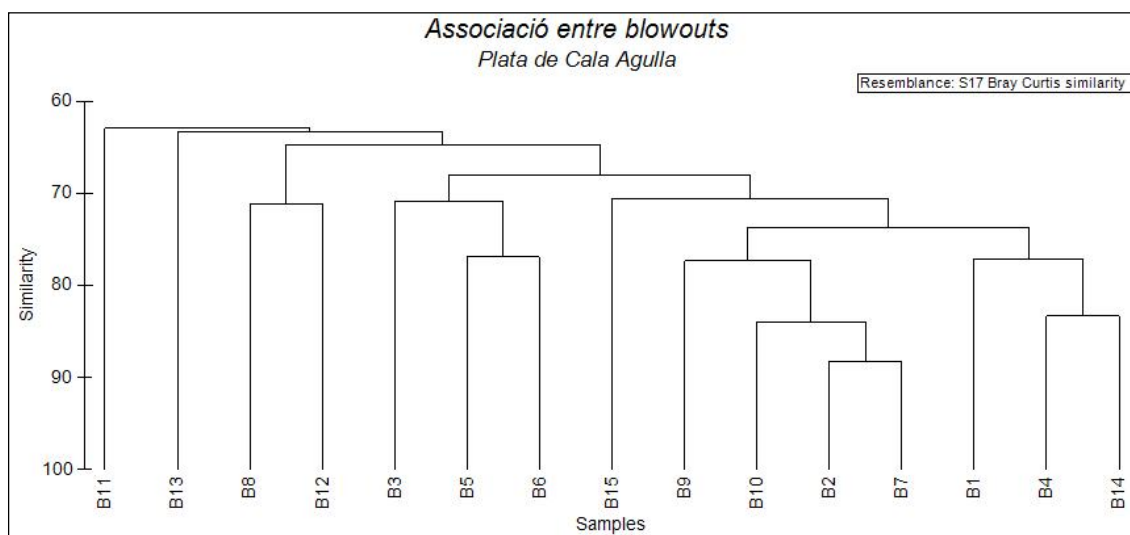
**Taula 27:** Valors derivats de l'aplicació de l'índex 0-1  $R_{t-v}$  per a tal de determinar els patrons de relació reals entre les espècies vegetals identificades i les tipologies de *blowout* al sistema de Cala Agulla.

D'igual manera, les diferències es tornen a percebre en el cas de les espècies llenyoses, no obstant amb menor intensitat. Així, les formes mixtes esdevenen de nou la tipologia que major relació presenta amb la vegetació llenyosa, amb un valor de  $R_{t-v}=0.438$ , mentre que la mínima es troba en el cas dels *bitten blowouts*, amb  $R_{t-v}=0.313$ . D'altra banda es pot observar com els *saucer* i *conical blowouts* es relacionen de la mateixa manera, ambdues tipologies amb valors de  $R_{t-v}=0.375$ .

A l'igual que en el cas de les herbàcies, també existeixen diferències vers a la relació que algunes espècies tenen amb les distintes tipologies. En aquest cas espècies tals com *Pinus halepensis* o *Juniperus phoenicea* es relacionen positivament amb cada tipus de *blowout*, amb valors molt propers a  $R_{t-v}=1$ , mentre que d'altres gairebé no mostren relació, com en són *Cistus salvifolius* o *Phillyrea angustifolia* (Taula 27).

### 3.1.2.2.8. Caracterització i agrupació integrada dels *blowouts*

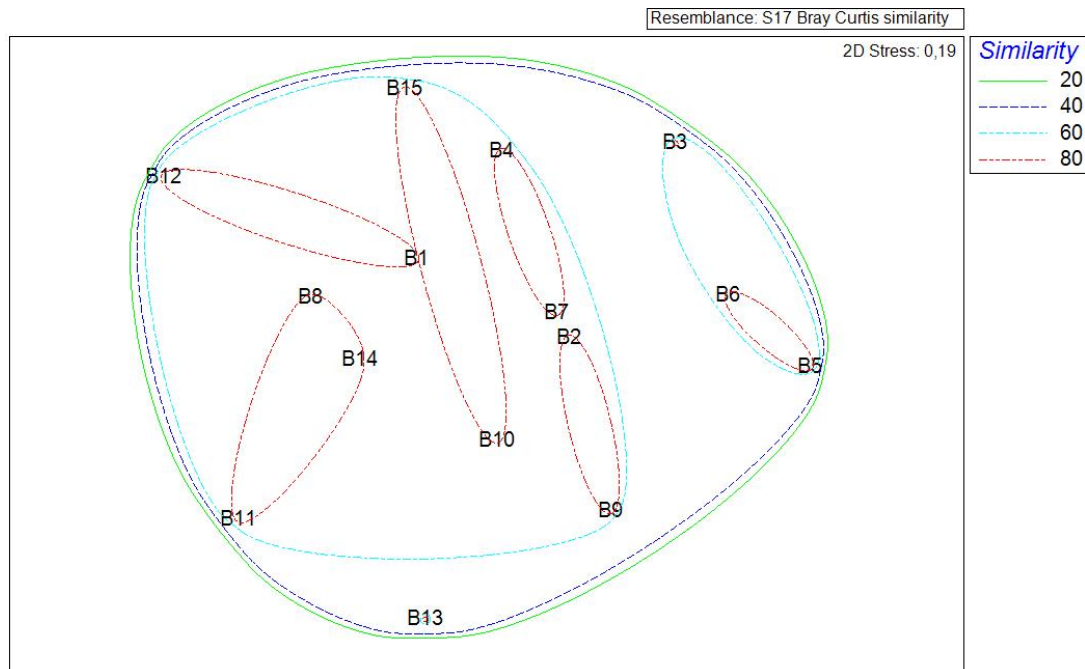
Un cop considerades totes les variables – taxonòmiques, geomorfològiques, i d'ús i gestió – amb les quals els 14 *blowouts* existents a Cala Agulla han estat analitzats, es postula com a una tasca poc nítida establir-ne patrons d'associacions clars – considerant el seu grau de similitud –. En termes generals el grau de proximitat entre les diferents morfologies és alt, oscil·lant entre el 62-90% (Figura 104). No obstant, se'n fa una tasca complexa establir patrons d'associacions distingint entre diversos grups. El màxim grau de similitud el trobem entre el BOA2 i BOA7, ambdós amb un grau de similitud del 90%. Aquests dos *blowouts* es troben inserits dintre d'un conjunt format endemés pel BOA10, 1, 4 i 14, amb patrons de relació superiors al 75% (veure part dreta de la Figura 104). No s'identifica cap cas en que el grau de similitud sigui del 100%, tal i com sí s'identifica, per exemple, en el cas d'es Comú. Contràriament, alguns *blowouts* tals com els BOA11 i 13 es troben un tant distants de la resta de la mostra, representant els menors valors de similitud, en aquest cas poc superiors al 60%.



**Figura 104:** Anàlisi *cluster* dels 14 *blowouts* analitzats a Cala Agulla a partir de la consideració de les seves característiques geomorfològiques, taxonòmiques i estat de gestió.

La manca de patrons clars de similitud a l'hora d'establir-ne grups diferenciats entre *blowouts* queda palesa a la Figura 104, la qual, sota una representació bidimensional mostra l'alt grau de dispersió expressat pels diferents punts de mostreig a l'hora de considerar-ne el grau de similitud que mantenen entre sí. En primer lloc destacar-ne la proximitat mostrada per BOA2 i BOA7 que, com ja s'ha comentat anteriorment, són els dos punts que mostren major similitud (90%). Hi ha casos aïllats els quals es relacionen entre sí amb valors pròxims al 80% - veure els punts connectats

per la línia vermella a la Figura 105 –, no obstant no apareixen com associacions de més de 2 *blowouts*. Concloent, l'alta dispersió mostrada en aquest cas queda palesa amb el baix grau d'estrès calculat a partir de l'índex *Bray Curtis similarity*, en aquest cas expressat en 0.19.



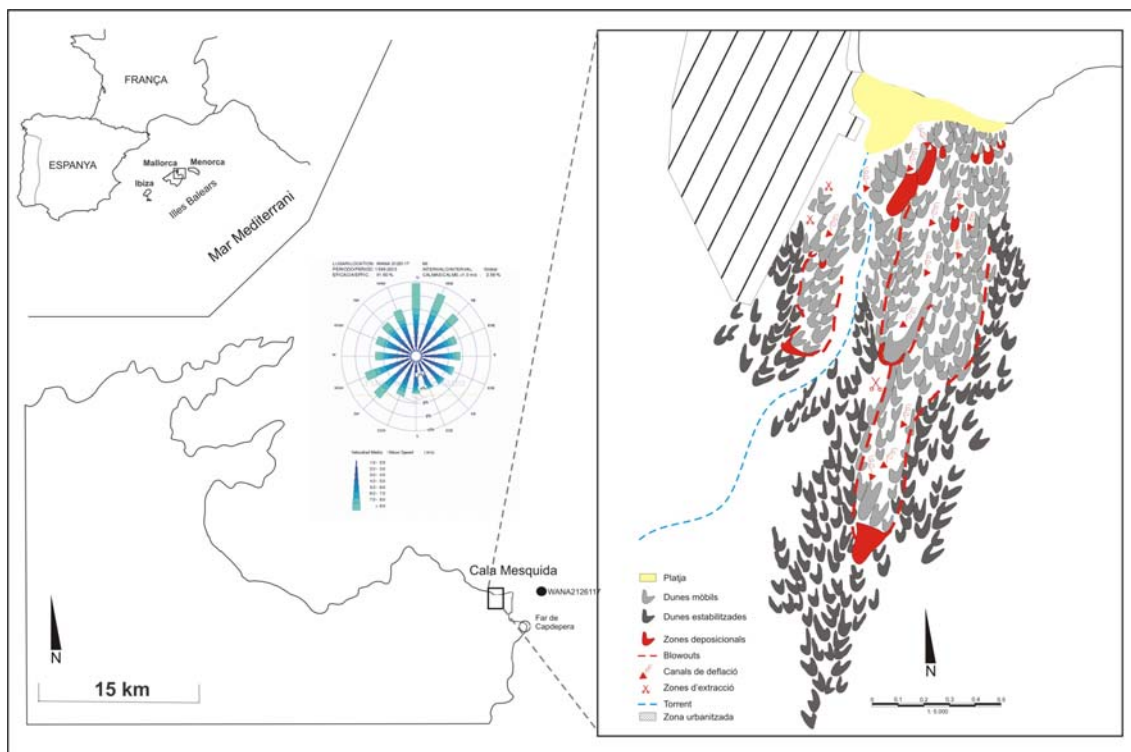
**Figura 105:** Representació – sense escala – de la dispersió mostrada per a cada un dels *blowouts* analitzats en funció del seu grau de similitud, relacionat amb les línies de unió mostrades. Aquesta figura es relaciona amb la Figura 104.

### 3.1.3. Sistema dunar de Cala Mesquida

#### 3.1.3.1. Localització i caracterització geogràfica del sistema

El sistema platja-duna de Cala Mesquida, proper al de Cala Agulla, es localitza al quadrant oriental de l'illa de Mallorca, inserit també dins el sí de la península de Llevant, i dins els límits del municipi de Capdepera (Figura 106). El sistema dunar es troba encaixat entre dos relleus estructuralment elevats, mentre que la seva orientació respon a la direcció dels vents predominants de component nord. Aquests dos elements esdevenen claus per a que Cala Mesquida contempli unes característiques geomorfològiques diferents a la resta de sistemes dunars arreu de l'illa. Tot plegat fa que el sistema dunar, d'uns 1.6 km<sup>2</sup>, adquireixi un desenvolupament notablement longitudinal, terra endins, i perpendicular a la línia de costa – veure esquema

geomorfològic a la Figura 106 –, enfront als cordons paral·lels que es disposen a la resta dels sistemes de l'illa.

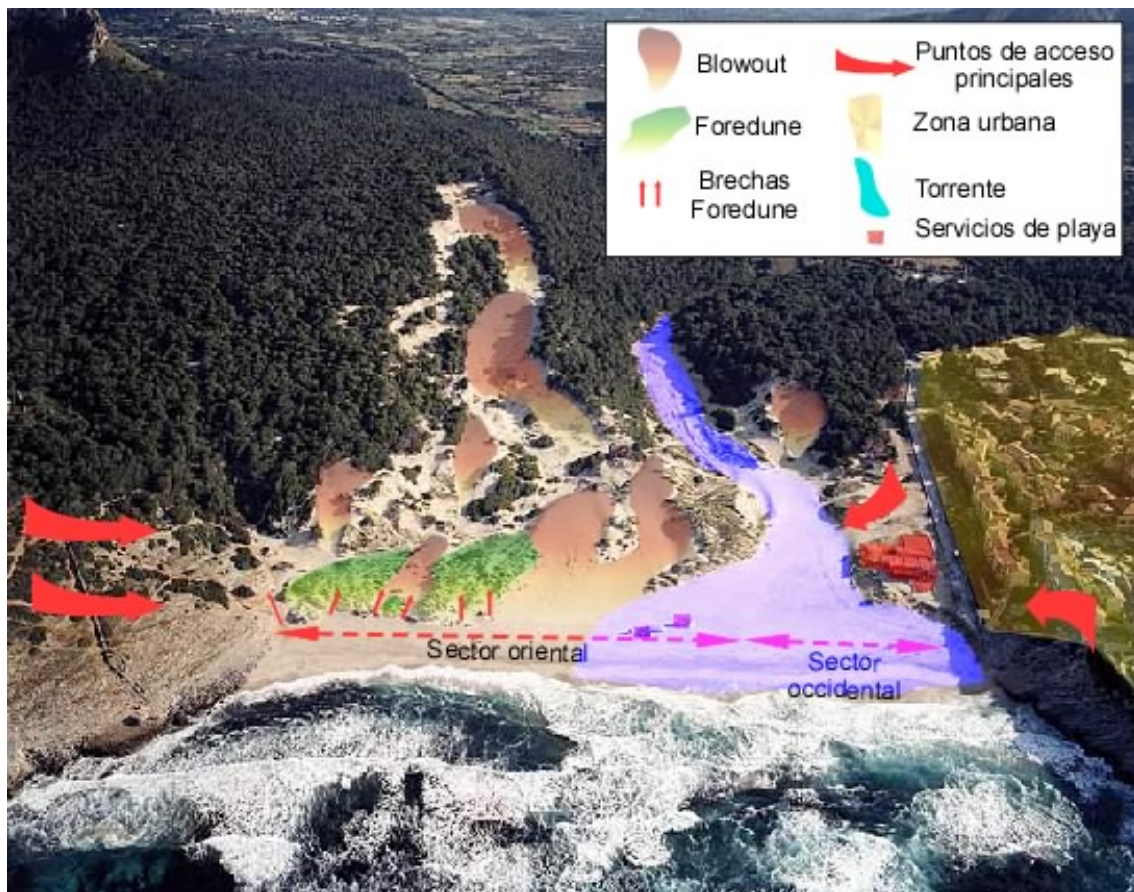


**Figura 106:** Localització geogràfica del sistema de Cala Mesquida, i representació esquemàtica de les característiques geològiques i geomorfològiques del sistema i voltants.

Les característiques intrínseques al sistema, fent-lo més dinàmic des del punt de vista sedimentari, fa que la seva caracterització física sigui abordada de manera diferent als altres sistemes fins ara analitzats, centrant-nos doncs en veure quins han estat els seus patrons evolutius des de 1956 fins a l'actualitat. Tal i com descriuen Martín-Prieto et al. (2007) la Figura 107 mostra la disposició longitudinal del sistema i la divisió del seu front dunar en dos sectors a conseqüència de la desembocadura del torrent de sa Mesquida. El sector oriental, a on es desenvolupa la zona de *foredunes* i que ocupa la major part del sistema, i el sector occidental, el qual ocupa una franja més estreta encaixada entre el torrent i l'àrea urbanitzada situada a l'oest del sistema.

A grans trets, del sector oriental en destaca la fragmentació de la *foredune* a conseqüència de l'evolució de distintes morfologies *blowout*. Endemés també destacar les superfícies de deflació en el sector més pròxim al torrent, el qual degut a la dinàmica

fluvio-torrencial, esdevé el més dinàmic sent erosionat cada cop que es produeixen grans vingudes, limitant doncs el desenvolupament d'una primera línia de dunes ferma. La presència del torrent esdevé un agent natural el qual potencia notablement l'erosió sedimentària des de la platja alta de cap a l'interior, incrementant la canalització del flux eòlic. Pel que fa al sector occidental, aquest es troba sotmès íntegrament a la presència del torrent. Endemés esdevé el principal accés a la platja per part dels usuaris, fet que ha suposat una major pressió socio-recreativa, alterant-ne les seves característiques naturals (Figura 107).



**Figura 107:** Vista obliqua del sistema dunar de Cala Mesquida – orientada cap al sud – S’hi distingeixen els dos sectors, occidental i oriental, i el desenvolupament del sistema dunar, perpendicular a la línia de costa (Martín-Prieto et al., 2007).

### 3.1.3.2. Evolució espai-temps del sistema dunar de Cala Mesquida

#### 3.1.3.2.1. Evolució del front dunar (1956-2010)

La realitat mostrada avui pel front de dunes de Cala Mesquida suggereix que el retrocés controlat per processos erosius ha estat la tònica dominant al llarg de les darreres dècades. Aquesta realitat, de fet, queda mostrada quantitativament amb les anàlisis espai-temps dutes a terme en la present tesi en el període 1956-2010.

	1956-1979	1956-1989	1956-1997	1956-2002	1956-2006	1956-2010
<b>Retrocés absolut (m)</b>	-2,32	-8,60	-11,26	-10,24	-10,80	-20,13
<b>EPR (m/a)</b>	-0,10	-0,27	-0,28	-0,22	-0,15	-0,37

**Taula 28:** Patrons de retrocés acumulat en el front dunar de Cala Mesquida entre el període 1956-2010 – les dades sempre prenen com a referència la situació de 1956 –.

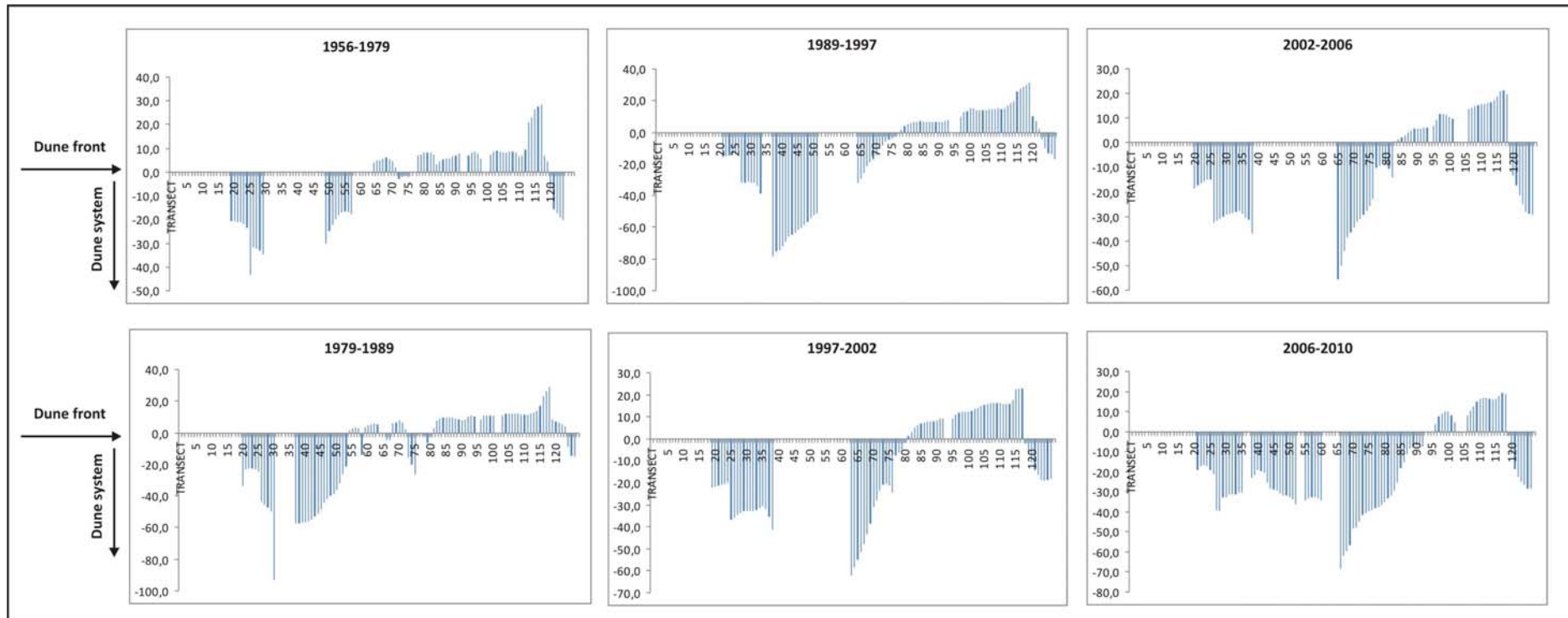
Si s'analitza íntegrament, el front de duna en aquest sistema ha retrocedit, en valors mitjans, un total de -20.13 m, amb una tendència de -0.37 m/any (Taula 28). No obstant, la tendència seguida no ha estat homogènia des d'una perspectiva espacial. El sector occidental, controlat per la desembocadura del torrent de sa Mesquida i per la pressió antròpica – al ser el principal accés a la platja – es mostra com un dels sectors més erosionats, no mostrant en cap cas patrons d'acreció sedimentària (Figura 108). El retrocés mitjà – en termes absoluts – sofert per aquest sector es situa en els -27 m, amb una tendència de -0.5 m/any –aquest es dona sobretot a la zona est del sector, ja que la resta, afectat per la dinàmica fluvial, no comptava amb primera línia al 1956 –. La zona central del sector oriental ha estat la que major retrocés ha sofert en el període d'estudi. La degradació progressiva de la línia de *foredunes* i el posterior desenvolupament de formes erosives *blowout* ha fet que aquest es situï en els -31.4 m, amb una tendència de -0.5 m/any. No obstant, és precisament en aquest sector oriental a on es troba l'única zona que ha experimentat una accreció sedimentària, ajudant a la recuperació del sistema. La primera d'aquestes zones de creixement, la més propera a la zona central, ha sofert un avanç fixat en els 7.6 m, amb una taxa de creixement de 0.1 m/any. La segona zona identificada és la que major creixement experimenta, amb un creixement absolut de 15.4 m i amb una taxa que es fixa en els 0.3 m/any (Figura 108).



**Figura 108:** Anàlisi sobre els processos de retrocés i creixement en el front dunar de Cala Mesquida pel període 1956-2010.

L'evolució i comportament del front dunar de Cala Mesquida també suggereix apreciacions des d'un punt de vista temporal. Així, si ens fixem amb la Figura 109 veiem com la tendència erosiva ha estat progressiva i acumulada des de 1956 fins a l'actualitat. La situació mostrada pel període 1956-1979 mostra encara una situació d'acreció estesa en bona part del front dunar, sobretot en el seu sector oriental. No obstant l'erosió és la que impera amb el pas del temps arribant a la situació actual, mostrada per la gràfica del període 1956-2010, a on l'escenari es caracteritza per un retrocés gairebé integral. Entre ambdues situacions els processos erosius indueixen a un retrocés progressiu del front de duna.

Si s'analitza per períodes, entre 1956-1989 es produeix un retrocés mitjà fixat en els -6.28 m, amb una taxa de -0.17 m/any. Aquesta tendència es redueix en els propers anys (e.g. 1989-1997; -2.66 m i -0.01 m/any) arribant a ser positiva entre 1997-2002, amb un lleuger avanç de 1.02 m i amb una taxa de 0.06 m/any. Tanmateix però, aquesta tornarà a ser negativa, arribant inclús als valors màxims de retrocés en el període 2006-2010, amb -9.33 m i una taxa de -0.22 m/any (Taula 29).



**Figura 109:** Anàlisi sobre els processos de retrocés i creixement en el front dunar de Cala Mesquida per períodes, sempre partint de la situació inicial de 1956.

	1956-1979	1979-1989	1989-1997	1997-2002	2002-2006	2006-2010
<b>Evolució absoluta (m)</b>	-2,32	-6,28	-2,66	1,02	-0,56	-9,33
<b>EPR (m/a)</b>	-0,1	-0,17	-0,01	0,06	-0,07	-0,22

**Taula 29:** Patrons de retrocés acumulat en el front dunar de Cala Mesquida per períodes.



3.1.3.2.2. Variació de la cobertura vegetal (1956-2010)

La cobertura de vegetació herbàcia a la primera part del sistema de dunes de Cala Mesquida, aquella formada per les dunes davanteres i la part més activa de les dunes mòbils i semi-estabilitzades, també ha sofert una important degradació des de 1956 fins a l'actualitat.

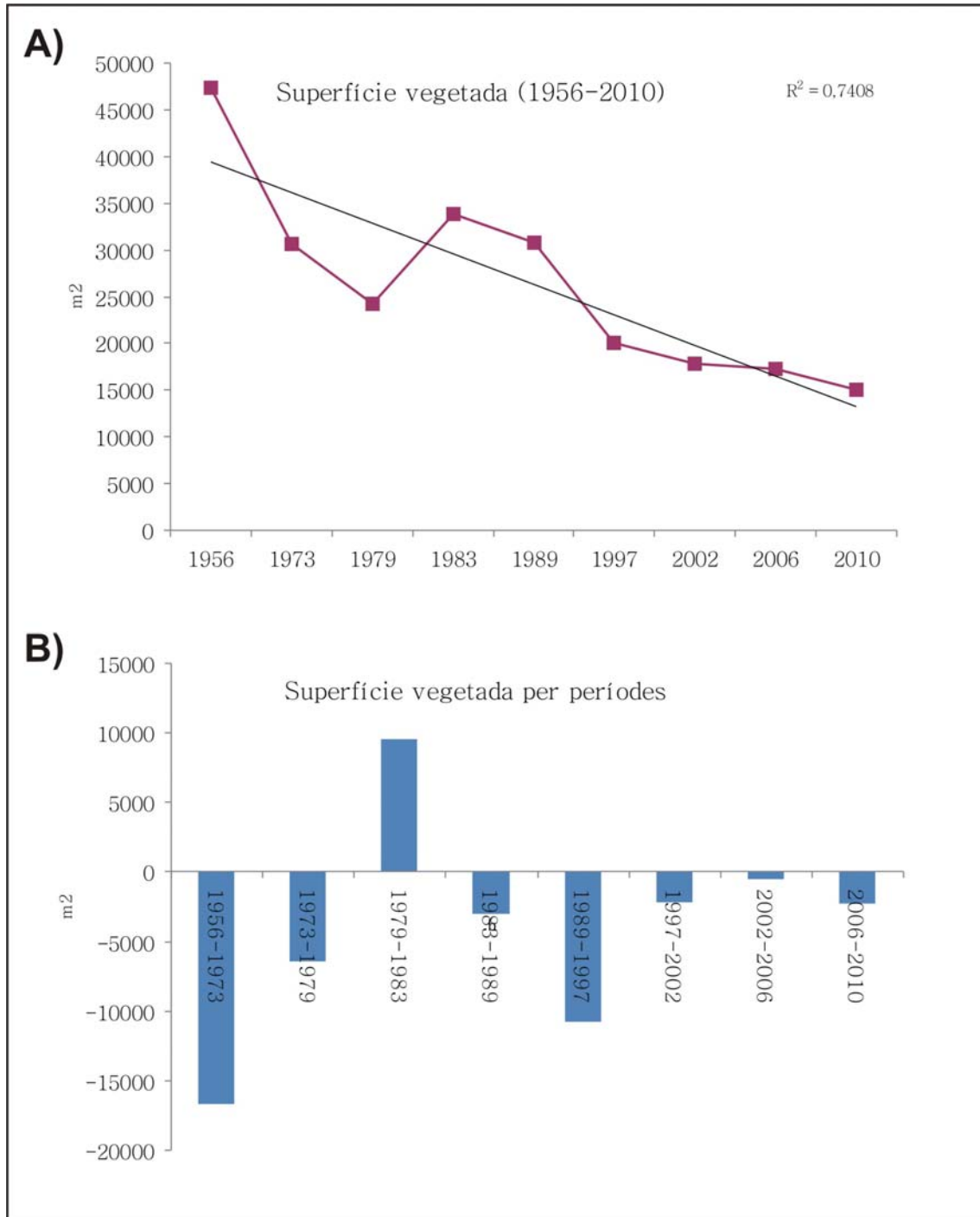
Any	Sup. Vegetada (m <sup>2</sup> )	Període	Sup. Vegetada (m <sup>2</sup> )
1956	47352	1956-1973	-16670
1973	30592	1973-1979	-6389
1979	24203	1979-1983	9580
1983	33783	1983-1989	-2991
1989	30792	1989-1997	-10796
1997	19996	1997-2002	-2173
2002	17823	2002-2006	-512
2006	17311	2006-2010	-2288
2010	15023		

**Taula 30:** Evolució de la superfície colonitzada per vegetació herbàcia al front dunar de Cala Mesquida. A l'esquerra de la taula es distingeixen les respectives superfícies per a cada un dels anys analitzats, mentre que a la dreta es fa el respectiu pels diferents períodes temporals analitzats.

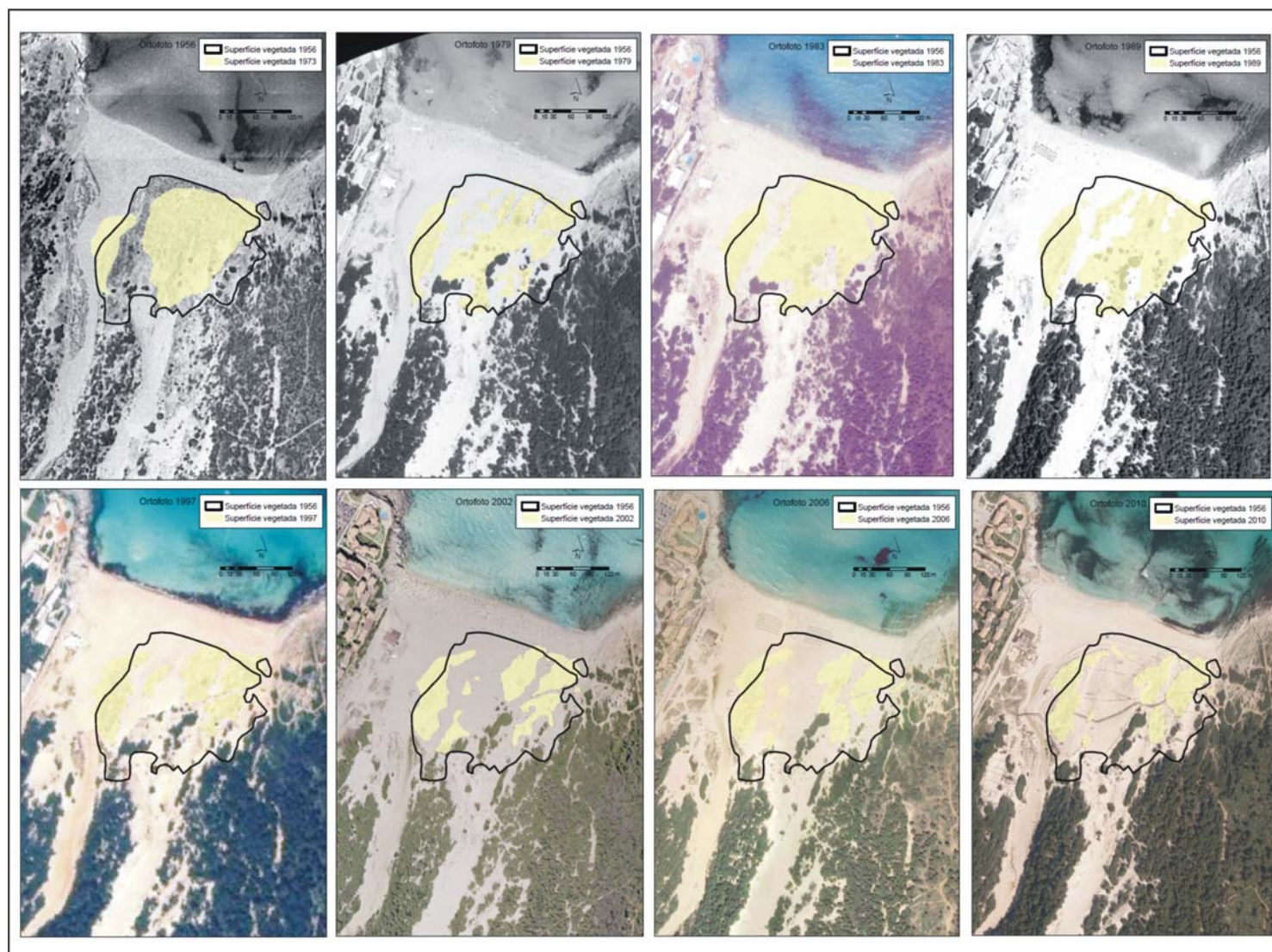
Si s'analitza l'evolució considerant per separat cada un dels anys analitzats es pot observar com la disminució de la vegetació ha estat massiva i progressiva en el temps. La màxima cobertura es troba al 1956, esdevenint la situació inicial característica de l'etapa pre-turística, amb un total de 47.352 m<sup>2</sup>. No obstant, a partir d'aquest moment el descens és gairebé sostingut i descendent, a excepció de la situació mostrada al 1983, la qual amb 33.783 m<sup>2</sup> mostra una certa recuperació vers a l'any precedent. Pel que fa a la mínima superfície aquesta s'associa amb la situació de 2010, sols amb 15.023 m<sup>2</sup> (Taula 30 i Figura 110A). En termes absoluts, en el període 1956-2010 la disminució de la superfície vegetada es fixa en 32.329 m<sup>2</sup>.

Si s'analitza amb perspectiva, es pot observar com entre 1956 i 1979 hi ha una disminució dràstica de la cobertura vegetal (-23.149 m<sup>2</sup>), possiblement associada a l'empremta massiva de l'activitat turística – aquesta comença al 1960 – i a la manca de mesures de gestió (Figura 110A). No obstant, es produeix una lleugera recuperació de cap a 1983, amb un increment de 9.580 m<sup>2</sup>. Tanmateix aquesta esdevindrà efímera ja

que des de llavors la disminució serà progressiva, sols amb un petit període d'estabilització mostrat entre 2002 i 2006, amb 17.823 m<sup>2</sup> i 17.311 m<sup>2</sup> respectivament.



**Figura 110:** Evolució espai-temps de la superfície vegetada en el front dunar de Cala Mesquida. A la part superior (A) es mostra l'evolució considerant cada un dels anys analitzats entre el període 1956-2010, mentre que a la part inferior (B) es fa el propi considerant-la en períodes temporals determinats. Ambdues gràfiques es relacionen amb la Taula 30.



**Figura 111:** Cartografia sobre l'evolució de la superfície vegetada en el front dunar de Cala Mesquida. Cada fotograma respon a l'evolució experimentada entre 1956 i els respectius anys analitzats.

La disminució de la cobertura vegetada no ha estat homogènia en el temps, sinó que ha experimentat distintes intensitats. Si aquesta s'analitza per períodes (Taula 30 i Figura 110B) es veu que la màxima disminució es dona entre 1956-1973, fixant-se en  $-16.670 \text{ m}^2$ , destacant també la degradació soferta entre 1989-1997, amb  $-10.796 \text{ m}^2$ . D'altra banda, la Figura 110B ens permet observar de nou el creixement experimentat en el període 1979-1983, o bé la certa estabilització mostrada entre 2002-2006, només amb una variació de  $-506 \text{ m}^2$ . Cal fer esment especial a la degradació mostrada entre 1989-1997 ( $-10.796 \text{ m}^2$ ), particularment destacable enfront a les seves situacions precedents i posteriors.

Espacialment parlant, la part central del sector oriental ha estat la que major degradació ha sofert (Figura 111), podent-se associar al desenvolupament de la dinàmica sedimentària en aquesta franja a conseqüència de la formació i desenvolupament de morfologies *blowouts* en primera línia. Aquesta apreciació queda manifesta entre la situació mostrada al 1956, amb una cobertura vegetada prou òptima, i la que es dibuixa al 1979, reflectint la presència d'incisions que es desenvolupen des de la primera línia de duna cap a l'interior. Aquesta tendència de degradació seguirà d'ara endavant, no obstant amb l'excepció mostrada – i ja quantificada anteriorment – al 1983, a on es veu en la seva cartografia com la superfície mostra una notable recuperació.

Cal remarcar que els processos de degradació s'inicien amb la desaparició de la vegetació en primera línia. Aquest escenari queda reflectit primer al 1979, i després al 1989, moment a partir del qual la disminució de la coberta vegetada serà progressiva fins arribar al darrer escenari estudiat (2010). Així, si ens fixem en els patrons cartografiats mostrats a la Figura 111, la desaparició, primer, de la vegetació en primera línia suposa la conseqüent degradació de la coberta vegetada a la resta del sistema. I és que aquest primer pas de degradació du en sí una reactivació dinàmica i sedimentària del sistema el qual afectarà, també, al seu estat ecològic.

#### 3.1.3.2.3. Evolució dels lòbuls (*blowouts*)

L'estat de degradació i retrocés del front dunar de Cala Mesquida (tractat a l'epígraf 3.1.3.3.1.), la disminució progressiva i massiva de la cobertura vegetada (tractat a l'epígraf 3.1.3.3.2.) i el control exercit pel marc estructural de la zona (tractat a

l'epígraf 3.1.3.2.) han fet que el sistema dunar, integralment, s'hagi desenvolupat terra endins seguint una direcció perpendicular – o si més no obliqua – a la línia de costa, que com ja ha estat esmentat amb anterioritat, esdevé un fet característic si es compara amb els altres sistemes de dunes costaneres insulars. La vista obliqua mostrada per la Figura 107 il·lustra a la perfecció aquest fet, reflectint gràficament la dimensió espacial adquirida vers al desenvolupament integral del sistema, principalment a partir de dos grans lòbuls. Considerant el funcionament teòric de les morfologies *blowout* (veure més a l'apartat 1.6.), en aquest cas també s'identifica una zona d'erosió situada a la primera franja del sistema dunar – alterada i condicionada per una tendència erosiva en el seu front, i per una disminució de la cobertura vegetada –, i una zona deposicional, situada a la part més interior del sistema en forma de grans lòbuls.

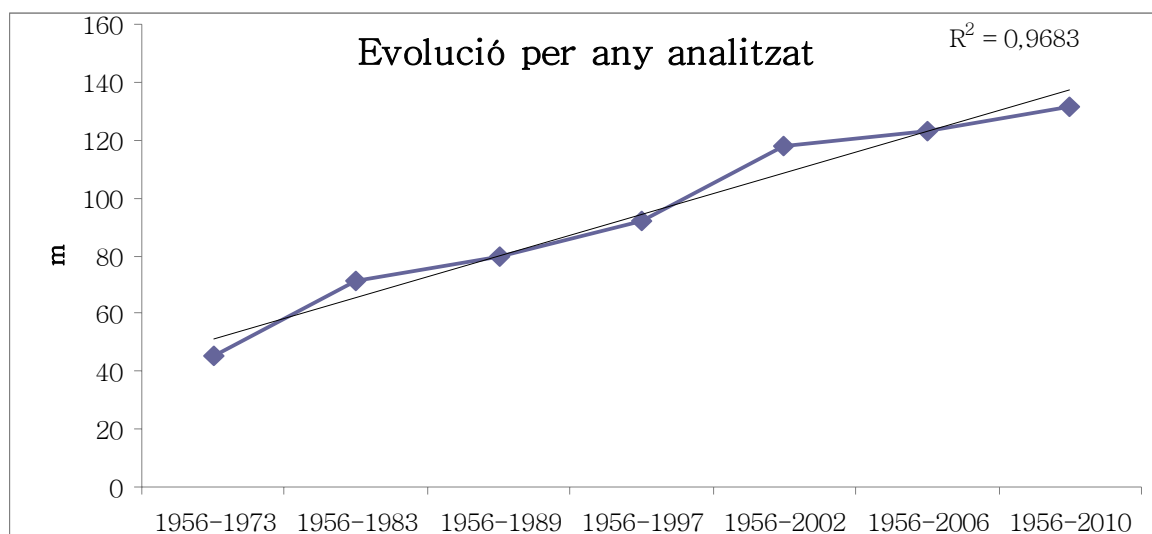
Tot i la seva singular particularitat, i admetent tots els matisos i diferències d'escala, el desenvolupament del sistema dunar de Cala Mesquida, també amb ajuda de la seva situació estructural – des del punt de vista geològic – esdevé paradigmàtica dels patrons d'evolució seguits per les morfologies *blowout*. L'anàlisi espai-temps realitzada ens permet veure com ha estat aquesta evolució, i la seva relació amb l'estat de conservació de la primera línia de dunes.

<b>Longitud <i>blowout</i> (m)</b>	
1956-1973	45,3
1956-1983	71,1
1956-1989	80
1956-1997	92,2
1956-2002	118
1956-2006	122,9
1956-2010	131,8
media	82,7
devest	31,4

**Taula 31:** Evolució del principal *blowout* a Cala Mesquida. Les dades respectives a cada any parteixen de la situació mostrada al 1956.

Des de la situació inicial mostrada al 1956 el creixement del *blowout* ha estat constant des del punt de vista temporal i espacial (Taula 31 i Figura 112). Així, partint d'una longitud de 45.3 m des del front dunar, aquesta no deixa d'augmentar terra

endins, fins arribar als quasi 132 m a 2010, la qual cosa suposa que la taxa d'evolució mitjana al llarg del període analitzat es fixi en 2.1 m/any.

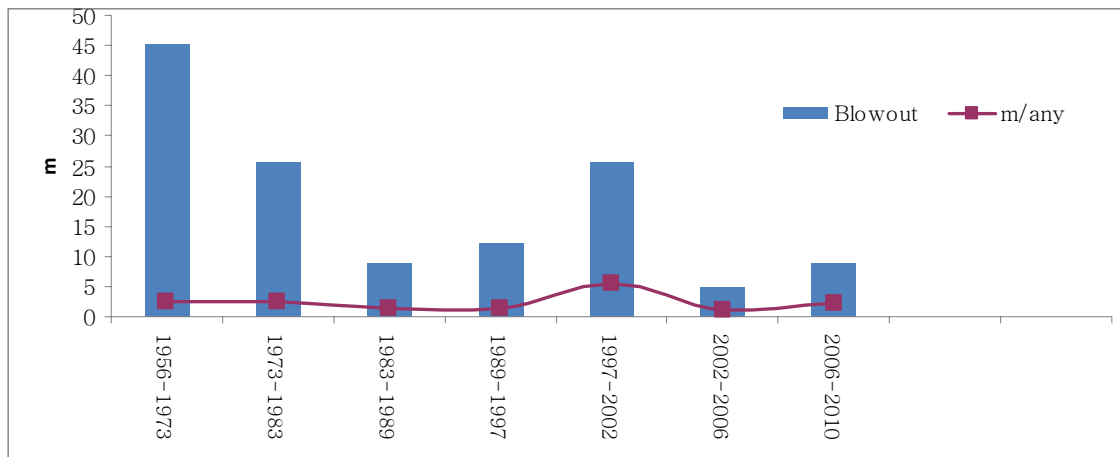


**Figura 112:** Representació gràfica de l'evolució del principal *blowout* a Cala Mesquida. Les dades respectives a cada any parteixen de la situació mostrada al 1956.

No obstant aquesta evolució, tot i que ha estat constant des de 1956 fins a l'actualitat, no ha estat homogènia. Així, si l'analitzem per períodes es perceben diferents intensitats de creixement (Taula 32 i Figura 113). El major avanç es produeix en el període entre 1956-1973, amb un avanç del lòbul fixat en 45.3 m i una taxa de creixement de 2.6 m/any, mentre que la mínima es situa entre 1983-1989, amb 8.9 m i una taxa de 1.5 m/any. Destacables són els avanços mostrats en els períodes 1973-1983 i 1997-2002, ambdós amb un avanç de 25.8 m. És a aquest segon període quan es produeix la taxa de creixement mitjà més alta, fixada en 5.6 m/any.

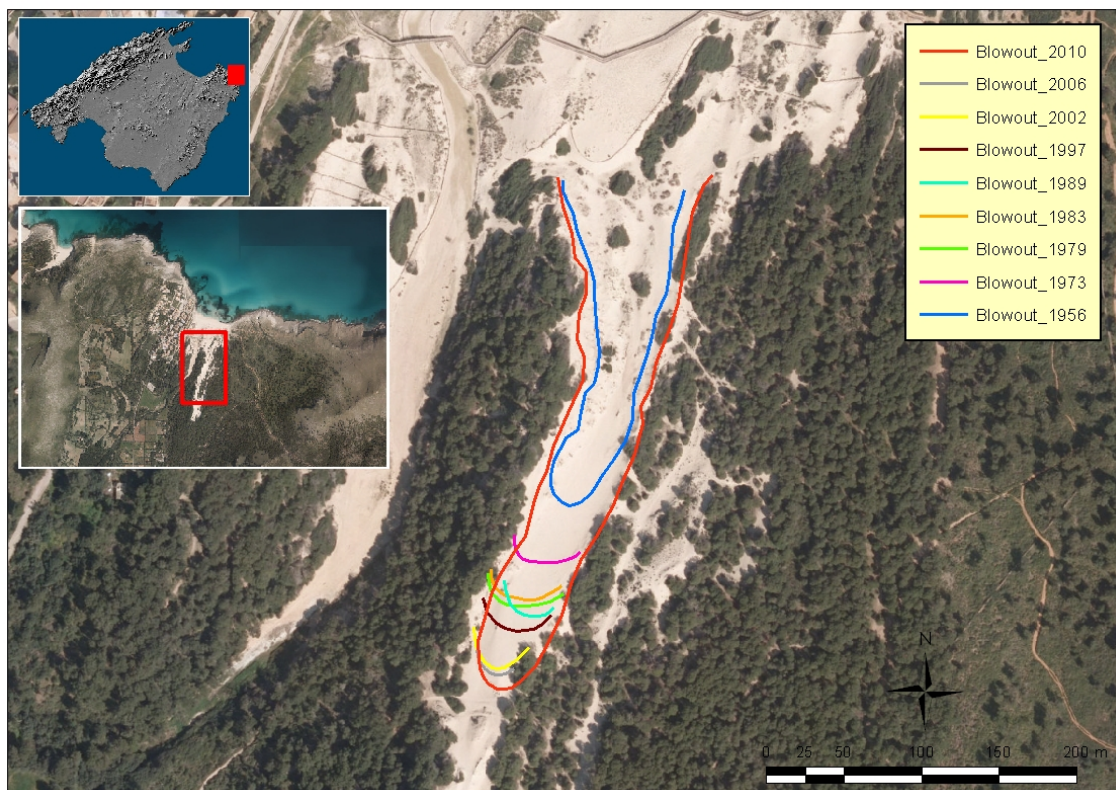
	<i>Blowout</i>	m/any
1956-1973	45,3	2,6
1973-1983	25,8	2,5
1983-1989	8,9	1,5
1989-1997	12,2	1,5
1997-2002	25,8	5,6
2002-2006	4,9	1,2
2006-2010	8,9	2,2

**Taula 32:** Evolució del principal *blowout* a Cala Mesquida per cada un dels sub-períodes analitzats.



**Figura 113:** Representació gràfica de l'evolució del principal *blowout* a Cala Mesquida per a cada sub període analitzat.

El creixement ha estat perpendicular a la línia de costa, derivant-ne amb una morfologia aproximada a la típica de les *trough blowout* (Figura 114). Aquesta evolució ha suposat un input de sediment notable a la part estabilitzada del sistema, suposant per tant algunes alteracions des del punt de vista ecològic, sobretot pel que fa al desenvolupament de la massa boscosa de *P. halepensis*.



**Figura 114:** Cartografia sobre l'evolució del *blowout* principal existent al sistema de Cala Agulla (1956-2010). La cartografia està feta sobre la imatge aèria de 2012.

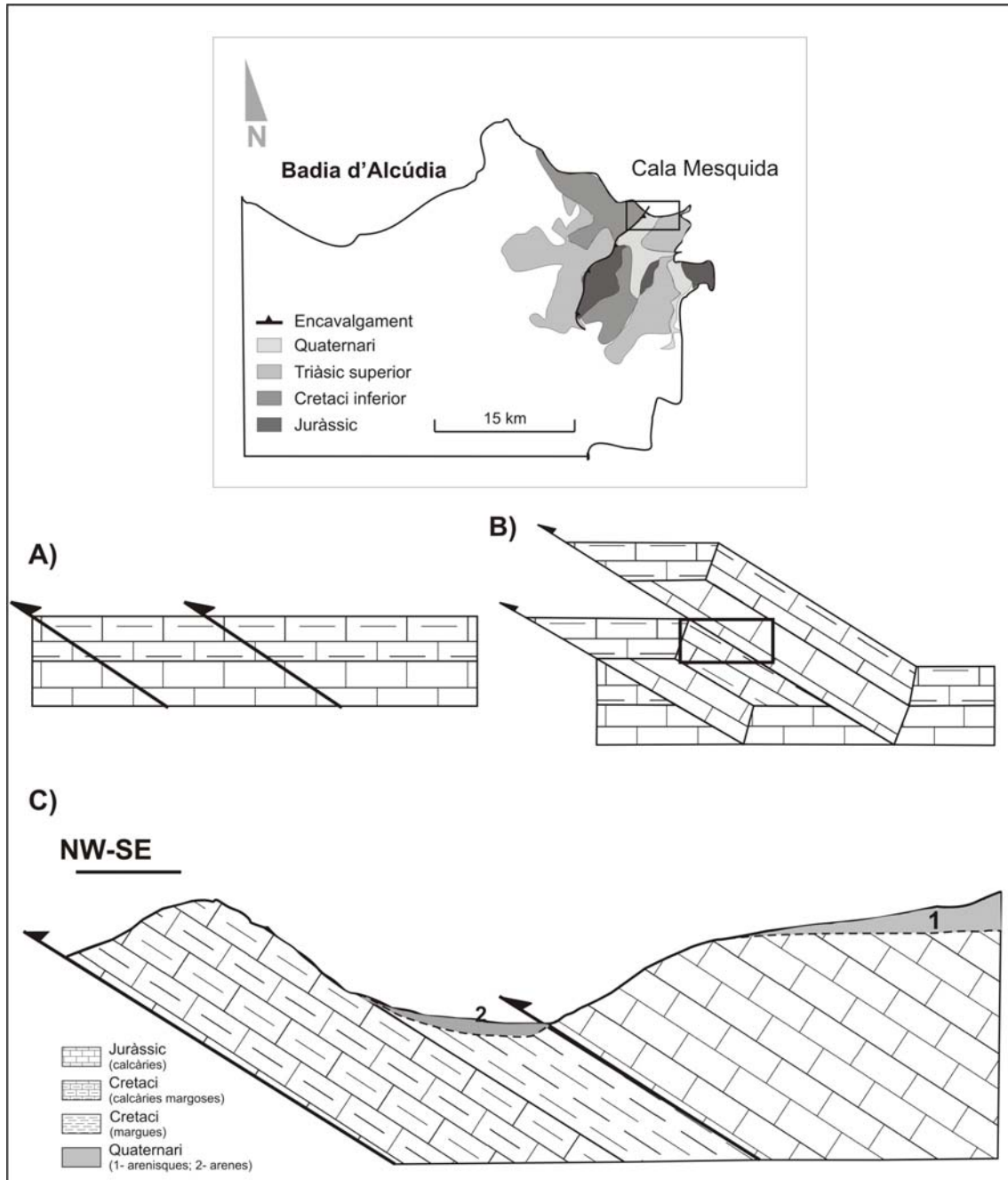
### *3.1.3.3. Influència del control estructural sobre el desenvolupament del sistema dunar*

Com s'ha vist fins al moment, varis són els agents i factors atribuïbles a la evolució del sistema dunar de Cala Mesquida al llarg dels darrers decennis. D'entre ells recordar com a factors claus l'estat de conservació i/o degradació del front dunar, o bé la disminució massiva i sostinguda de la cobertura vegetal – principalment herbàcia – des de 1956 fins a l'actualitat. No obstant, en sistemes com el present sembla haver-hi indicis de que altres factors, tals com la disposició geològica estructural, poden tenir un pes considerable vers al comportament i evolució integral de tot el sistema.

La composició i distribució general del sistemes dunars a les Illes Balears, per norma general, es dona a partir de la formació de cordons de dunes parabòliques distribuïdes de manera paral·lela a la línia de costa, disposant-se de forma ordenada terra endins (e.g. veure es Comú de Muro, a la Figura 62 de l'epígraf 3.1.1.1.). No obstant, de l'observació de sistemes tals com Cala Mesquida a Mallorca, o s'Olla a Menorca (tractat a l'epígraf 3.2.3.3.) s'en desprèn un comportament diferent atribuït a patrons d'evolució marcats pel desenvolupament del sistema dunar de manera perpendicular a la mateixa línia de costa. Com ja ha estat tractat en la present tesi, tot sistema sedimentari necessita de dos agents claus per a la seva formació i posterior evolució; el sediment i el vent. Obviant que aquests dos requisits es donen en ambdues situacions, la disposició estructural circumdant es postula com la peça que pot explicar el comportament diferencial de sistemes com Cala Mesquida.

Sembla a ser que el control estructural a les Illes Balears ja s'ha documentat en altres ambients costaners. Així, Gómez-Pujol et al. (2013) posen de manifest el control que esdevé l'estructura geològica amb la presència de cales al sud de les illes de Mallorca i Menorca, i també al cas de Formentera. Amb tals precedents, tot i distints ambients, l'estructura geològica mostrada al cas de Cala Mesquida convida a pensar en tenir un paper clau vers al desenvolupament del sistema dunar terra endins, i de manera perpendicular a la línia de costa (Figura 106, epígraf 3.1.3.1.). A grans trets, la disposició topogràfica actual derivada de l'evolució estructural es postula com una autèntica plataforma de deflació que, ajudada per la incidència de vents incidents de N-NE, facilita el transport sedimentari terra endins, amb una migració del sistema de dunes perpendicular a la línia de costa.





**Figura 115:** Esquema (sense escala) de la disposició estructural de Cala Mesquida (Mallorca).

Des del punt de vista estructural, l'estructura bàsica de Cala Mesquida passa per un encavalgament de materials del Juràssic – calcàries – per a sobre de les margocalcàries del Cretaci. D'aquesta manera, els materials del Juràssic conformen la vessant SE de la cala, mentre que les calcàries margoses del Cretaci es disposen a la vessant NO. Tots els materials cabussen uns 30° cap al SE (Figura 115).

Des del punt de vista geomorfològic la cala es dona damunt els materials més margosos – i per tant més fàcilment erosionables – del Cretaci, donant lloc a una vall estreta i perllongada terra endins amb direcció NE-SW. Aquest escenari és el que dona lloc doncs a l'espai d'acomodació sobre el qual els sediments s'hi posiciona i desenvolupa, i que compta amb la mateixa orientació que la cala. És doncs per aquest motiu que l'espai d'acomodació, en aquest cas, queda notablement condicionat pel control estructural circumdant a la cala, i també a conseqüència de l'erosió diferencial de materials.

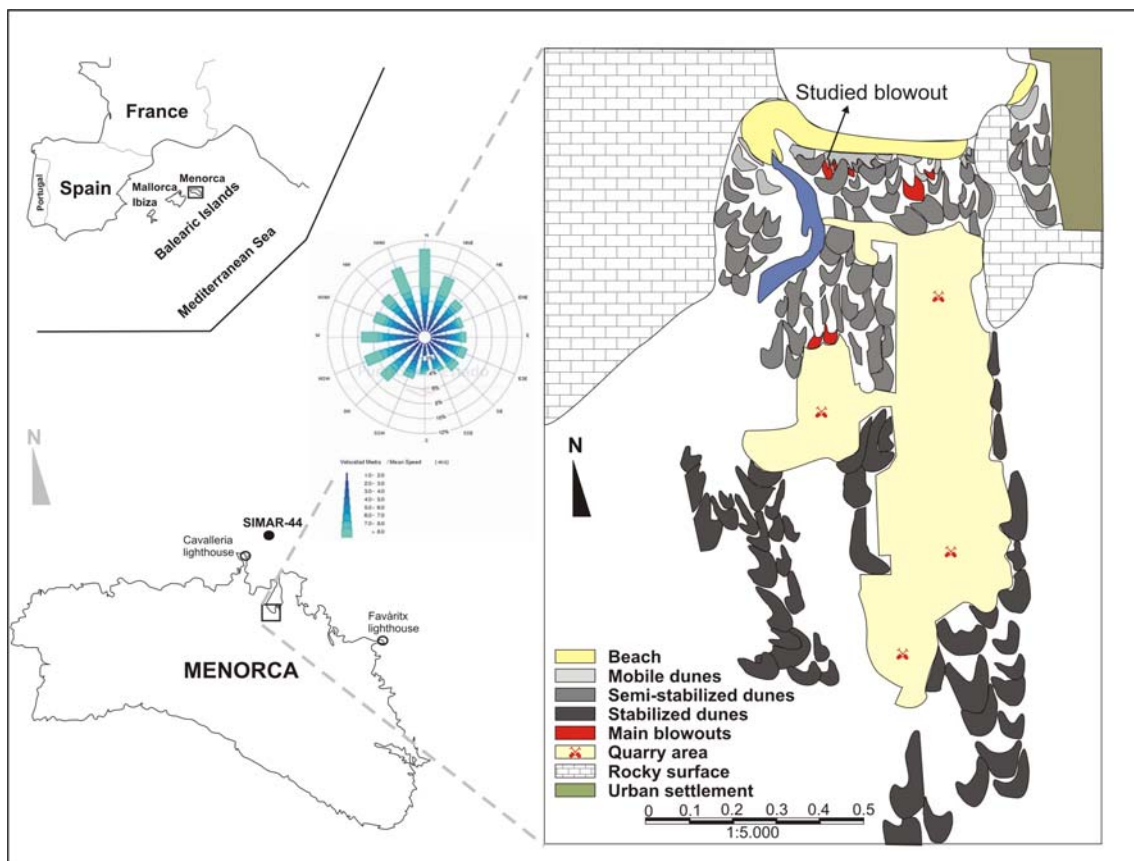
Concloent, el cas de Cala Mesquida, com tot sistema sedimentari, compta amb els agents bàsics per a la seva formació i evolució; sediment, vent, i espai d'acomodació. No obstant, la disposició geomorfològica i direccional en aquest cas sembla estar altament relacionada amb el control estructural, sobretot vers a la fisonomia de l'espai d'acomodació sedimentària, que coincidint amb l'erosió diferencial dels materials més blans – calcàries margoses del Cretaci –, és el que facilita el desenvolupament del camp de dunes terra endins, de forma perpendicular a la línia de costa.

### 3.2. Menorca

#### 3.2.1. Sistema dunar de Cala Tirant

##### 3.2.1.1. Localització i caracterització geogràfica del sistema

El sistema platja-duna de Cala Tirant es situa a la zona central de la costa nord (Tramuntana) de l'illa de Menorca, la més septentrional i oriental de les Illes Balears (Figura 116). Forma part dels límits del municipi d'es Mercadal, i des del punt de vista físic es localitza a la Badia de Tirant, situada entre la península occidental de Fornells i la costa oriental de Cap de Cavalleria. Les seves característiques fan que esdevingui un sistema molt actiu, caracteritzat per importants embats i per la canalització dels vents de Tramuntana – component nord –, fet que condicionen el dinamisme apreciat en els sistema dunar encara actiu, i el seu desenvolupament terra endins.



**Figura 116:** Localització geogràfica del sistema platja-duna de Cala Tirant, i representació de les característiques geomorfològiques del sistema dunar (Mir-Gual et al., en resivió).

A grans trets el sistema dunar de Cala Tirant es desenvolupa terra endins a partir d'una platja arenosa d'uns 350 m de longitud i entre 20-40 m d'amplada, i la qual

ocupada una superfície aproximada als 16.256 m<sup>2</sup>. La integritat del sistema cobreix avui una superfície lleugerament superior a les 13 ha, no obstant molt inferior a la seva cobertura originària a conseqüència de la indústria extractiva existent a la zona en la segona meitat del segle XX.



**Figura 117:** Sectorització del sistema platja-duna de Cala Tirant (Menorca). La imatge il·lustra la desconexió física existent entre el sector de dunes mòbils i el sector de dunes estabilitzades a conseqüència de les activitats extractives dutes a terme a la zona al llarg de molts anys.

Les característiques intrínseques al sistema, ajudades també per les condicions eòliques que caracteritzen la costa nord de Menorca, fan que aquest esdevingui notablement actiu, principalment en la seva part davantera. La pressió turística associada a la platja i la manca de mesures de gestió sostenibles amb el sistema al llarg de molts anys va suposar una total desaparició de la línia de *foredune*. No obstant, al llarg de les darreres dècades els esforços – per part de les administracions – destinats a la seva recuperació semblen tenir èxit, sent avui possible tornar a diferenciar l'existència d'un cordó embrionari de primera duna o *foredune* colonitzat principalment per *Ammophila arenaria* (Figura 117). Avui encara es percep un cordó ben definit de dunes mòbils les quals participen ben activament del balanç sedimentari i que s'estenen a la part occidental del sistema, fins a uns 600 m terra endins. Cal fixar-se amb l'alteració soferta en la franja oriental del mateix a conseqüència de les activitats d'extracció d'àrids (Figura 117). Finalment, és possible diferenciar també la presència

de dunes estabilitzades. Aquestes es caracteritzen per la seva discontinuïtat i pels signes que avui encara perduren de la gran pressió antròpica existent al llarg d'anys. De l'anàlisi fotomètrica se'n percep l'alt grau de fragmentació en aquesta zona, derivant-ne amb zones degradades les quals han quedat desconnectades del funcionament natural del sistema platja-duna.

#### 3.2.1.1.1. Sector de dunes davanteres

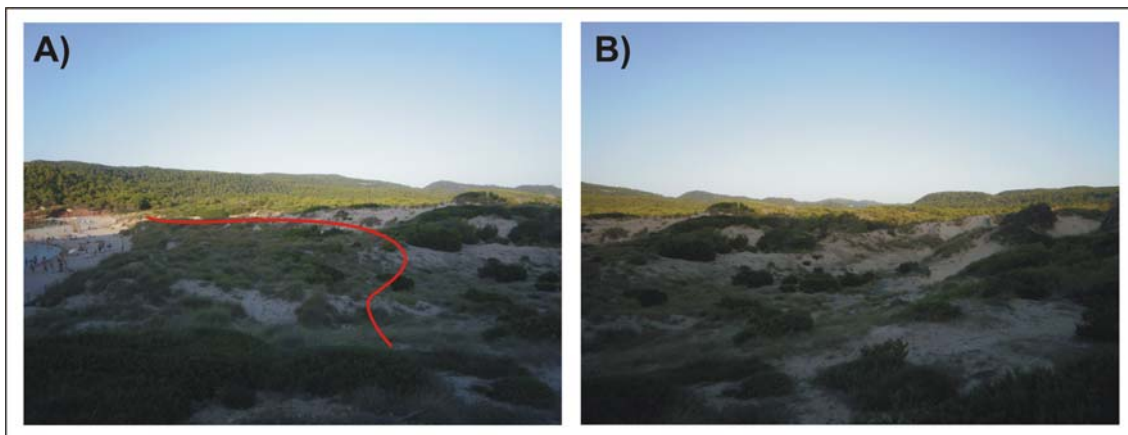
El cas de Cala Tirant és un bon exemple per a reflectir la recuperació de la línia de *foredune* a partir de l'aplicació de mesures de gestió blanques i sostenibles amb les característiques de l'ambient. La pressió turística i la manca d'una política gestora òptima va fer que de cap a mitjans-finals de la dècada dels 90 del segle passat fos difícil establir una diferenciació de *foredunes* a la part superior de la platja alta. No obstant, avui, dècades més tard, aquestes tornen a tenir-hi presència, també amb una recuperació ecològica associada. Actualment aquesta franja suposa una cobertura superior als 20.000 m<sup>2</sup>, esdevenint en bona part del front dunar un cordó ben definit format per morfologies arenoses embrionàries i colonitzades per vegetació herbàcia, principalment per *Ammophila arenaria* (Figura 118 i 119A).



**Figura 118:** Panoràmica del desenvolupament de la línia de *foredunes* a Cala Tirant, del creixement de vegetació herbàcia – *Ammophila arenaria* –, i del consegüent increment de la rugositat en el terreny.

Com ja ha estat esmentat anteriorment, la recuperació de la *foredune* du intrínseca una recuperació de l'estat ecològic del front dunar, principalment expressat per la proliferació de vegetació herbàcia. Tot junt suposa un increment substancial de la rugositat – superficial – en la primera línia de duna, fet que incrementa la capacitat a

l'hora d'interferir amb la dinàmica eòlica incident i també, en tant a la retenció de sediments (Figura 118).



**Figura 119:** Imatges de la part més activa del sistema platja-duna de Cala Tirant. Per una banda la presència d'un cordó embrionari de *foredune* a la part occidental del sistema (A), i d'altra la presència de dunes actives, parcialment colonitzades per vegetació, però que encara juguen un paper important en tant a la dinàmica sedimentària del sistema (B).

#### 3.2.1.1.2. Sector de dunes mòbils o semiestabilitzades

Avui la presència de dunes mòbils a Cala Tirant és encara important, tot i la forta pressió soferta al llarg del temps. Tal i com mostren les Figures 116 i 117 aquestes tenen una cobertura important i es desenvolupen terra endins d'una manera considerable. D'altra banda la Figura 119B reflecteix com participen activament de la dinàmica sedimentària del sistema, amb una cobertura vegetal heterogènia que permet el transport sedimentari amb facilitat. Aquest sector cobreix actualment una superfície aproximada a les 13 h, i s'estén des de la línia de costa fins a uns 550 m de cap a l'interior. Les dunes són principalment parabòliques, desenvolupant-se en formes simples i compostes o superposades – *superimposed* – (Servera, 1997).

La presència de *blowouts* en primera línia de duna ha fet que hi hagi algunes intrusions sedimentàries importants, expressades amb grans lòbuls de deposició que s'estenen terra endins, i que suposen una reactivació notable del sistema. Aquest fet deriva amb un increment de la dinàmica sedimentària el qual afectarà al devenir del sector de dunes mòbils (veure Figura 21 de l'epígraf 1.6.4.).

#### 3.2.1.1.3. Sector de dunes estabilitzades

Aquest ha estat sens dubte el sector que major pressió ha sofert en el cas de Cala Tirant. El desenvolupament d'una activitat extractiva – industrial – al llarg de la segona meitat del segle XX va suposar una reducció considerable de la seva superfície, disminuint fins a un 50% la seva cobertura originària. Avui dia, segons Servera (1997), aquest ocupa sols uns 2.176 m<sup>2</sup>. Des del punt de vista geomorfològic l'estructura dunar és semblant al cordó de dunes mòbils, caracteritzant-se per formes parabòliques amb una estructura simple o superposada. Les encara persistents es troben desconnectades de la dinàmica sedimentària del sistema platja-duna, fixades principalment per pinar i savinar.

Els signes de degradació derivats de la mala praxis duta a terme en aquesta zona queda reflectida a la Figura 117. Avui es percep la presència de zones altament degradades a la part més interior del sistema, sobretot al llarg de la vessant oriental. Aquesta degradació no és tan sols des del punt de vista geomorfològic, amb la destrucció del sistema dunar pel seu aprofitament d'àrids, sinó també des del punt de vista ecològic, amb una reducció important de la massa boscosa de *Pinus halepensis* i savines.

#### 3.2.1.1.4. Caracterització climàtica

Cala Tirant presenta un clima semi-àrid, amb una precipitació mitjana anual al voltant dels 630 mm. Els vents principals són els de component nord – Tramuntana –, tot i que segons Servera (1997), només el 33% de les dunes respongui amb una orientació sud. Segons els registres dels Far de Favàritx i Cavalleria (Figura 116) mostren com els vents del nord són els més recurrents, i els que presenten una major nombre de dies amb velocitats superiors als 12 km/h. D'altra banda la boia SIMAR-44 ([www.puertos.es](http://www.puertos.es)) indica que pel període 1960-2001 aquests vents esdevenen els més significants a la zona, sent els més incidents en més del 15% dels dies contemplats. En termes generals aquests bufen a velocitats que oscil·len entre els 1-8 ms<sup>-1</sup>, arribant inclús a superar els 8 ms<sup>-1</sup> en més d'un 10% dels dies. No obstant, i d'acord a la irregular morfologia presentada per la costa nord de Menorca, hi ha altres direccions que nos es poden menysprear a l'hora de considerar-les tals com NNE o NNO.

El règim en aquest cas també és micromareal amb una oscil·lació inferior a 0.25 m. Les estimacions en el període 1960-2001 indiquen altures d'ona superior a 1 m en el

30% dels dies, i amb períodes de recurrència de entre 3-7 s. (boia SIMAR-44, [www.puertoes.es](http://www.puertoes.es)). En períodes altament energètics les ones poden superar altures de 5 m, principalment existents al llarg del període hivernal i derivades de grans temporals de tramuntana. A l'igual que succeeix amb els vents, la direcció principal de l'onatge és de nord. No obstant, i deguda la morfologia de la costa nord de l'illa, altres direccions també hi poden ser presents; e.g. NO o NE.

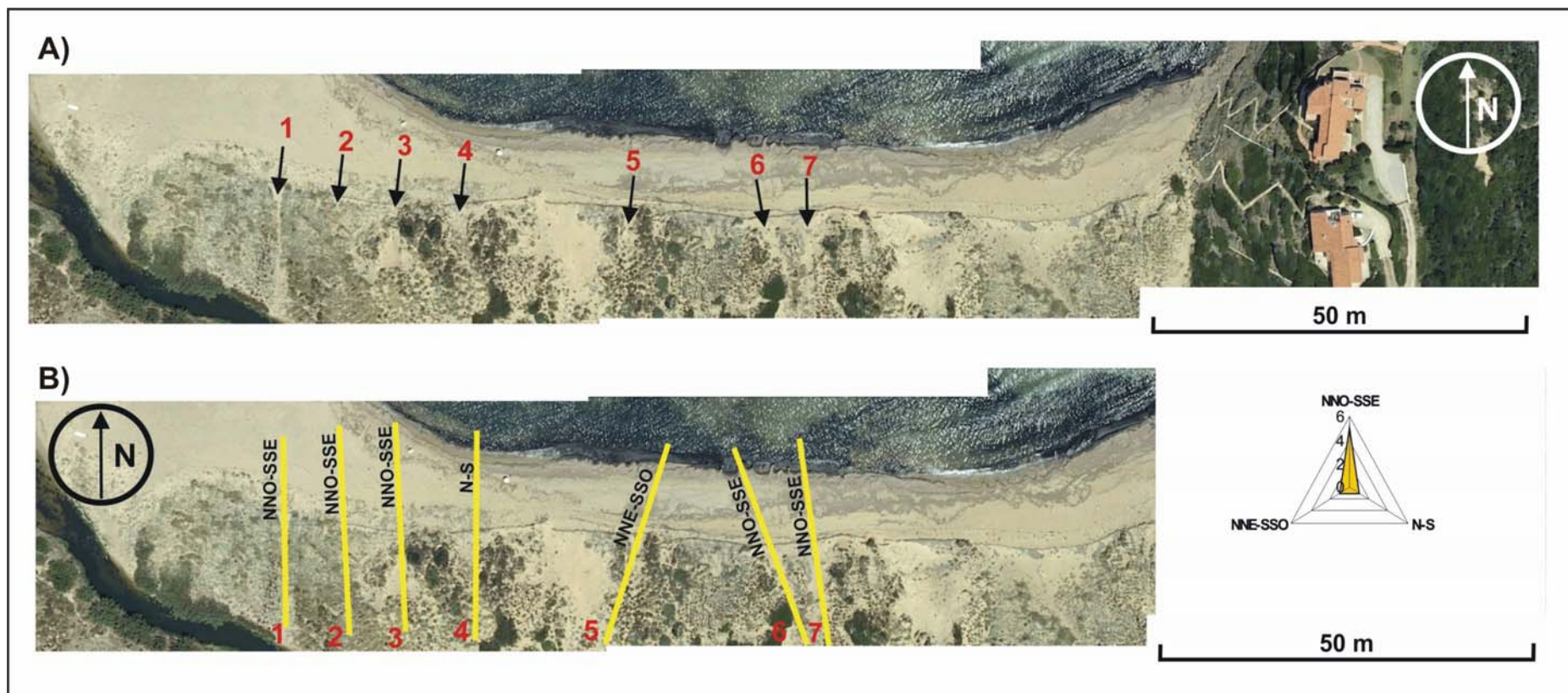
### 3.2.1.2. Les morfologies dunars al sistema de Cala Tirant. Resultats

El sistema dunar de Cala Tirant presenta avui un cert estat de recuperació. El seu alt dinamisme fa que de l'anàlisi fotomètrica en sigui difícil la precisa identificació de morfologies *blowout*. No obstant, al llarg de 350 m de front s'hi poden apreciar un total de 7 morfologies erosives, algunes d'elles de dimensions considerables (Figura 120A).

La seva distribució no és homogènia. Les majors densitats es localitzen a la part occidental del front dunar, coincidint amb l'entrada principal a la platja per part dels usuaris (Figura 120A). La part central i oriental són més alienes a la presència de morfologies erosives. Endemés cap dir que a la zona est hi ha una zona que, amb menor potència de duna, esdevé molt més dinàmica des del punt de vista sedimentari, suposant una zona topogràficament més deprimida la qual ajuda a la dinàmica sedimentària des de la platja cap a l'interior del sistema. En aquest cas la densitat expressada per la presència de *blowouts* al front de duna de Cala Tirant esdevé inferior als casos descrits fins al moment, fixada en 0.02 *blowouts/m*.

No es perceben zones altament degradades, sobretot a conseqüència de la pressió antròpica. Aquestes poc a poc s'han anat recuperant a partir de les mesures aplicades en les darreres dècades. Si bé és cert incidir amb l'existència de zones que, degudes les seves característiques morfològiques i topogràfiques, estenen les característiques típiques de la primera línia terra endins, com bé es remarcava pel cas del sector oriental.





**Figura 120:** Fotografia aèria de la platja i el front de duna de Cala Tirant (Menorca). A la part superior (A) es grafia la localització de les 7 morfologies *blowout* existents en primera línia, mentre que a la part inferior (B) és fa el mateix en tant a l'orientació seguida en cada cas. Pel que fa a la localització i cartografia de *blowouts* en aquest cas la fotografia aèria no esdevé com el millor mètode ja que, a conseqüència de la baixa cobertura vegetal – a diferència d'es Comú, per exemple –, els contrastos poden induir errors a l'hora de diferenciar entre *blowouts* o zones d'arena lliure. Aquest fet s'ha subsanat i complementat amb cartografia de detall a les distintes campanyes de camp realitzades

### 3.2.1.2.1. Dimensió i gradients de pendents dels blowouts analitzats

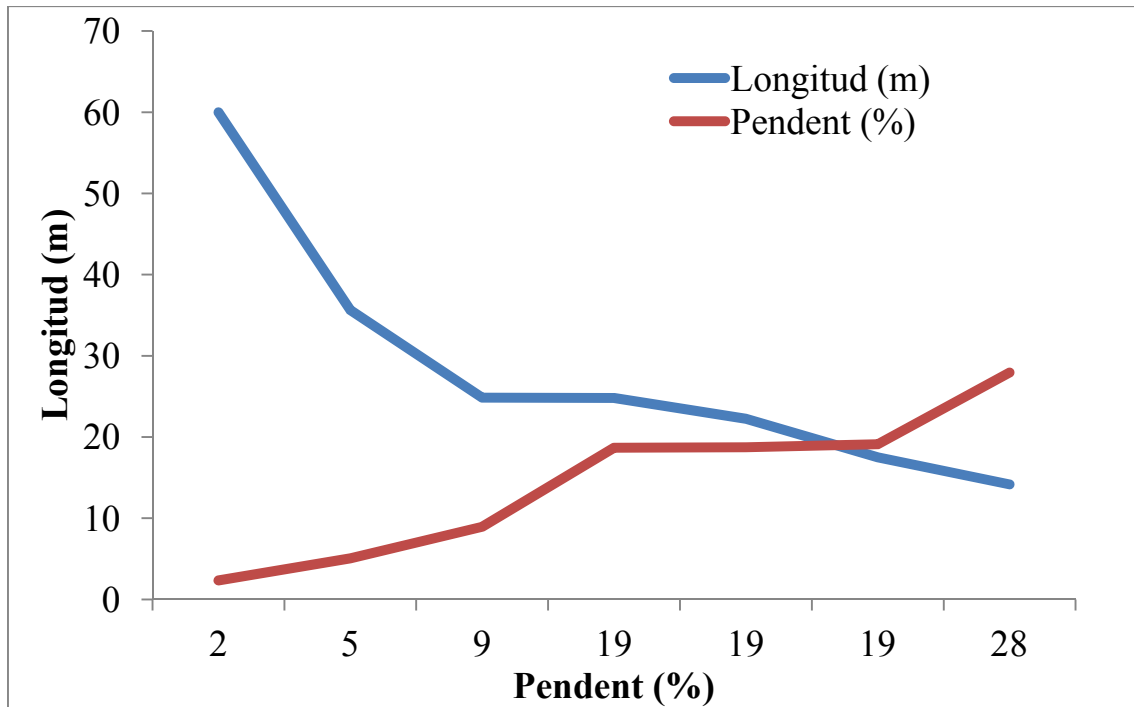
Les dades referents a les dimensions i pendent dels 7 *blowouts* identificats a Cala Tirant es mostren a la Taula 33. La longitud mitjana mostrada en aquest cas es fixa en 28.46 m, localitzant la màxima al BOT1, amb 60 m de longitud – aquest serà el *blowout* objecte d'estudi a l'apartat 4.2 – i la mínima al BOT5, amb sols 14.17 m. En tant al desnivell aquest es situa en un valor mitjà de 3.12 m, indicant el suau desenvolupament del sistema, en forma rampant. Els valors majors els localitzem al BOT2, amb 4.74 m, i al BOT6, amb 4,64 m, mentre que la mínima es situa al BOT1, amb 1,4 m. La pendent mitjana és del 14.4 %. En aquest cas la màxima es localitza al BOT5, amb 27.95 %, i la mínima al BOT1, amb 2.33 %.

La perspectiva dimensional de les dades obtingudes mostren que, en general, la pendent dels *blowouts* decreix a mesura que la seva longitud incrementa. En aquest sentit, el cas més representatiu queda manifestat pel BOT1, que amb una longitud de 60 m mostra el pendent mínim, sols del 2.33 %. Un altre exemple representatiu queda reflectit pel BOT3, amb 35.35 m i un pendent del 5%. Al contrari doncs, els *blowouts* que mostren menor longitud són els que presenten un pendent més pronunciat, com mostra per exemple el BOT5, amb 14.17 m i un pendent del 27.95 %, o el BOT4, amb 17.5 m i un pendent del 18.74 %.

Si s'analitza la correlació de *Pearson* a partir es veu com en cada cas existeix una correlació inversa. En el cas entre longitud i desnivell aquesta es fixa en  $r = -0.6$ , mentre que augmenta si considerem la relació entre longitud i pendent, amb  $r = -0.8$ . Aquest darrer valor s'apropa a una relació negativa perfecte entre les dues variables, indicant doncs com a mesura que la longitud del *blowout* incrementa, el seu grau de pendent decreix (Figura 121).

	Longitud (m)	Desnivell (m)	Pendent (%)
BOT1	60,00	1,40	2,33
BOT2	24,81	4,74	19,11
BOT3	35,63	1,80	5,05
BOT4	17,50	3,28	18,74
BOT5	14,17	3,96	27,95
BOT6	24,84	4,64	18,68
BOT7	22,24	1,99	8,95
<b>Mitjana</b>	<b>28,46</b>	<b>3,12</b>	<b>14,40</b>

**Taula 33:** Pendent, longitud (m) i desnivell (%) per a cada una de les morfologies *blowout* analitzades a Cala Tirant.



**Figura 121:** Gràfic de correlació entre la longitud i la pendent dels 7 *blowouts* caracteritzats a Cala Tirant.

### 3.2.1.2.2. Orientació dels *blowouts*

La disposició estructural de Cala Tirant, així com també de la pròpia badia en la qual està immersa, té un paper clau en tant al desenvolupament de tot el sistema dunar i també, de les morfologies *blowout* existents.

BO	Graus	Direcció
1	3	NNO-SSE
2	6	NNO-SSE
3	5	NNO-SSE
4	0	N-S
5	10	NNE-SSO
6	28	NNO-SSE
7	17	NNO-SSE

**Taula 34:** Direccionalitat de les morfologies *blowout* analitzades a Cala Tirant.

Pel que fa a les direccions dels 7 *blowouts* analitzats (Figura 120B) es veu un imperant predomini del traç NNO-SSE, contemplat per 5 de les morfologies i suposant el 71.4 % sobre el total de la mostra (Taula 34). Les altres direccions contemplades (e.g. N-S, NNE-SSO) també es relacionen amb la direcció incident dels vents del nord.

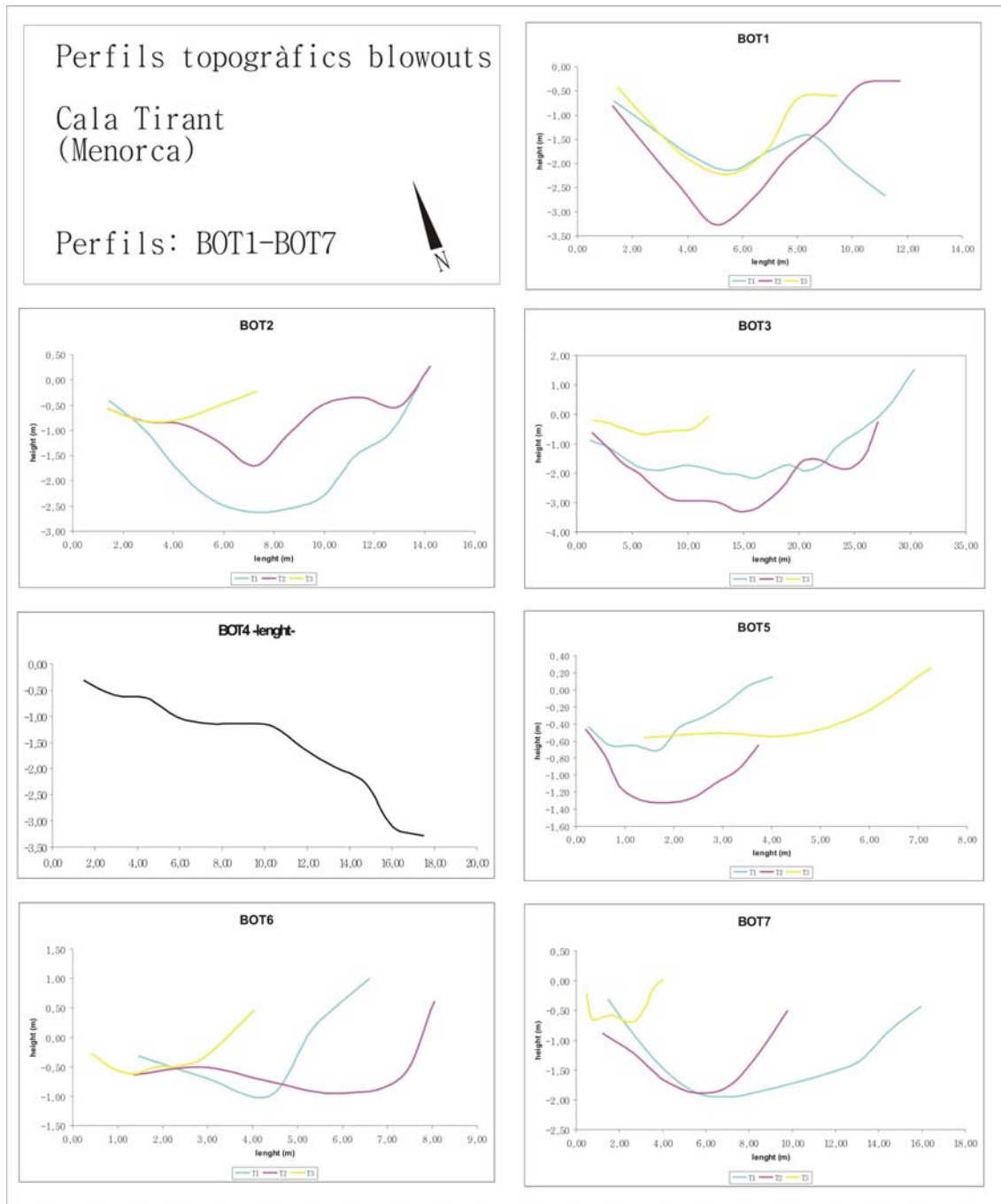
### 3.2.1.2.3. Morfometria i topografia interna

En termes generals, les dimensions dels 7 *blowouts* analitzats disminueixen des de la seva boca cap a l'interior. Aquesta tendència queda reflectida a la Taula 35 a on és veu com la mitjana dels perfils topogràfics aixecats passa de 13.66 m a T1, a 12.44 m a T2, i acaba amb 7,34 a T3. La màxima amplada a T1 es troba al BOT3, expressada en 30.36 m, mentre que la mínima es situa a BOT4, amb sols 4.02 m. En el cas de T2 el valor màxim es localitza al BOT3, amb 27.08 m, així com també la mínima es repeteix al BOT4, amb 3,73 m. Finalment, el BOT3 torna a obtenir la màxima de T3, amb 11,9 m, mentre que la mínima en aquest cas es troba al BOT6, amb 4.02 m. Hi ha alguns casos, sigui vist per exemple el BOT1, en el que les dimensions a T2 són incús lleugerament superiors a les de T1.

	Longitud (m)	T1	T2	T3
BOT1	41,57	11,20	11,75	9,49
BOT2	24,81	13,79	14,23	7,32
BOT3	35,63	30,36	27,08	11,90
BOT4	14,17	4,02	3,73	7,27
BOT5	28,84	6,60	8,05	4,05
BOT6	22,24	15,98	9,80	4,02
<b>Mitjana</b>	27,88	13,66	12,44	7,34

**Taula 35:** Amplada de cada un dels perfils topogràfics transversals aixecats en els *blowouts* de Cala Tirant. En vermell apareixen els valors màxims, i en blau ho fan els valors mínims identificats.

Endemés de les pròpies dimensions però, la diversitat morfològica dels perfils suggereix diferències en tant a la topografia interior dels *blowouts*, tal i com reflecteix la Figura 122. Alguns *blowouts*, com siguin el BOT1 o BOT2, presenten una topografia força còncava, sobretot a T1 i T2, fet que suposa la presència de parets laterals amb un pendent important i un encaixament topogràfic del *blowout* en sí. No obstant d'altres, com BOT3 o BOT6 presenten una topografia molt més plana, i no tant escarpada als seus laterals. D'altra banda, casos com BOT7 contemplen una amplada important a T1, amb una topografia relativament suau, però que després aquesta s'intensifica de cap a l'interior, dibuixant formes més encaixades controlades per pendents importants en els seus laterals.

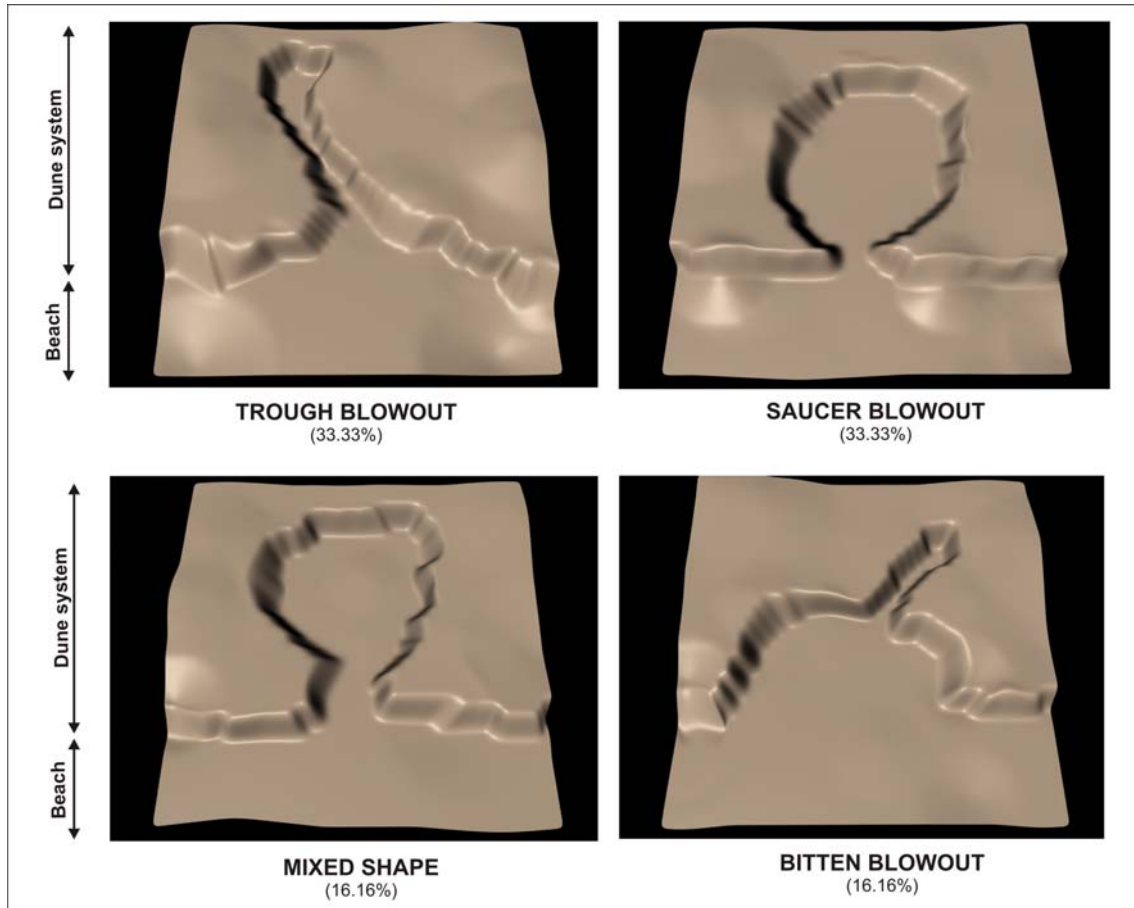


**Figura 122:** Perfils topogràfics interiors als *blowouts* de Cala Tirant. En el cas de BOT4 es presenta sols el perfil longitudinal, degut a que avui en dia es troba segellat i recuperat. Veim doncs com es presenta un perfil corresponent al que podria ser una primera duna en un sistema tabular.

#### 3.2.1.2.4. Classificació morfològica

Un total de quatre tipologies de *blowout* es poden diferenciar en el cas de Cala Tirant si es considera inicialment la seva forma en planta (Figura 123). D'aquesta manera diferenciem els *trough blowout* i els *saucer blowout* com a les morfologies que més presència tenen, ambdues representant el 33.33 %, mentre que d'altra banda es

troba un *blowout* mixte – *mixed shape* – i un *bitten blowout*, ambdues tipologies representant un 16.16 % respectivament. En aquest cas d'estudi no es perceben diferències vers a l'estructura presentada, sent totes morfologies simples.



**Figura 123:** Classificació morfològica de les morfologies *blowout* al sistema de Cala Tirant.

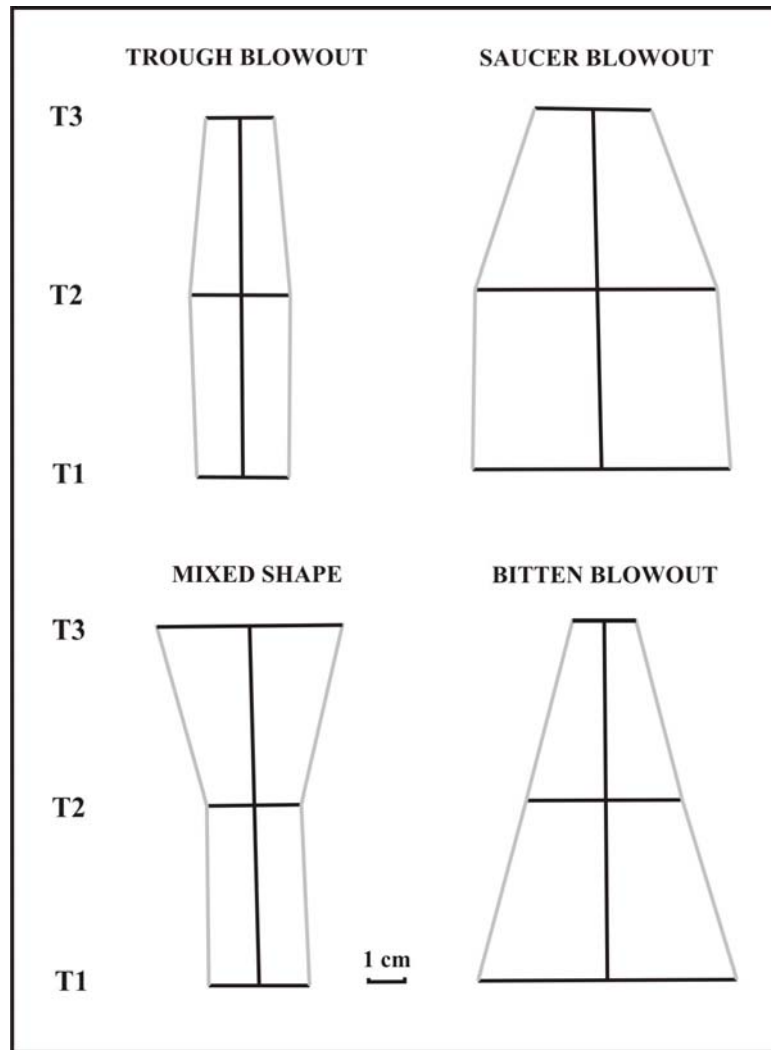
L'aplicació de l'índex  $iTx$  (explicat a l'apartat 2.2.5.) permet establir la classificació morfològica de les morfologies estudiades a partir de la relació existent entre els diferents perfils topogràfic transversals aixecats (T1, T2 i T3) i la longitud de la morfologia en qüestió. Així, dels resultats obtinguts a partir de l'aplicació d'aquest índex (Taula 36) es veu com els patrons de distribució morfològica són els mateixos i es corresponen a la classificació visual feta a partir de l'anàlisi fotomètrica. En la categoria de *trough blowout*  $iTx$  decreix lleugerament des de la boca a cap a l'interior ( $iT1= 0.25$ ,  $iT2= 0.28$ ,  $iT3= 0.18$ ), inclús experimentant un petit augment a la seva part central. En tot cas es dibuixa una morfologia allargada i estreta, en forma de corredor, típica d'aquesta categoria (Figura 124). En segon lloc, els *saucer blowout* presenten dimensions considerables en la seva boca i part central, mentre que disminueixen a la

part més interna ( $iT1= 0.71$ ,  $iT2= 0.67$ ,  $iT3= 0.32$ ). Aquesta tendència es tradueix en formes circulars o semi-circulars (Figura 124). Precisament les formes mixtes – *mixed shape* – presenten la tendència inversa al cas anterior. En aquest cas les dimensions a T1 i T2 són semblants, emperò augmenten notablement en la seva part interior ( $iT1= 0.28$ ,  $iT2= 0.26$ ,  $iT3= 0.51$ ). Finalment, els *bitten blowouts* parteixen d’una amplada considerable a la seva part frontal la qual es va disminuint progressivament de cap a l’interior ( $iT1= 0.72$ ,  $iT2= 0.44$ ,  $iT3= 0.18$ ) (Taula 36 i Figura 124).

$iT_x$	Lenght (m)	$iT1$	$iT2$	$iT3$	$iA$	
<b>Trough BO</b>	BOT1	41,57	0,27	0,28	0,23	
	BOT5	28,84	0,23	0,28	0,14	
	<b>Mean</b>	<b>35,21</b>	<b>0,25</b>	<b>0,28</b>	<b>0,18</b>	<b>0,24</b>
<b>Saucer BO</b>	BOT2	24,81	0,56	0,57	0,30	
	BOT3	35,63	0,85	0,76	0,33	
	<b>Mean</b>	<b>30,22</b>	<b>0,71</b>	<b>0,67</b>	<b>0,32</b>	<b>0,56</b>
<b>Mixed shape</b>	BOT4	14,17	0,28	0,26	0,51	<b>0,35</b>
<b>Bitten BO</b>	BOT6	22,24	0,72	0,44	0,18	<b>0,45</b>

**Taula 36:** Classificació morfològica dels *blowouts* de Cala Tirant a partir de l’aplicació de l’índex  $iTx$  (veure’l a l’apartat 2.2.5.).

Pel que fa a la quantificació de l’àrea dels *blowouts* analitzats i de la seva relació amb cada una de les categories a partir de l’índex  $iA$  (explicat a l’apartat 2.2.5.) es pot apreciar com en aquest cas són els *saucer blowouts* els que major superfície ocupen, amb un valor de  $iA= 0.56$ . D’altra banda, destacar també el cas dels *bitten blowouts* – en part per les dimensions adquirides a la seva part frontal –, amb  $iA= 0.45$ . Després ja es troben les formes mixtes, amb  $iA= 0.35$ , i la mínima als *trough blowouts*, amb  $iA= 0.24$  (Taula 36). En aquest darrer cas, l’expansió del *blowout* es dona a partir d’un corredor estret i encaixat el qual no suposa una cobertura espacial excessiva.



**Figura 124:** Representació esquemàtica a escala de la classificació morfològica a partir de l'aplicació de l'índex  $iTx$  en el cas de Cala Tirant (relacionada amb la Taula 36).

### 3.2.1.2.5. Inventaris florístics i caracterització taxonòmica del front dunar

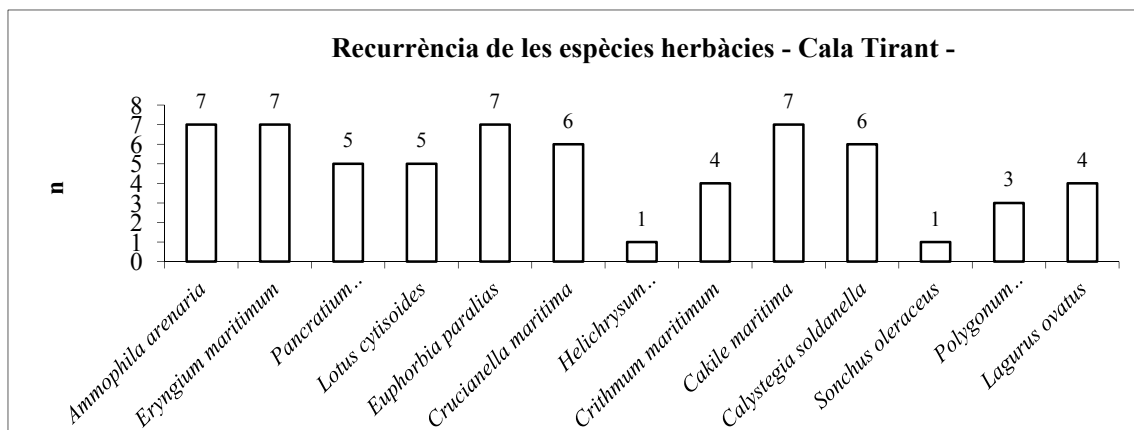
A l'igual que els altres sistemes analitzats fins al moment en el cas de Cala Tirant distingim també entre la presència de vegetació herbàcia i vegetació arbustiva. De nou el primer grup és el més nombrós i divers, en aquest cas amb un total de 13 espècies principals (Taula 37). D'aquestes, les més recurrents són *Ammophila arenaria*, *Eryngium maritimum*, *Euphorbia paralias* i *Cakile maritima*, totes elles identificades als 7 *blowouts* i, per tant, amb una taxa de recurrència del 100%. Un segon grup, també amb presència important serien aquelles que s'identifiquen entre 4 i 6 *blowouts*, com són *Crucianella maritima* i *Calystegia soldanella* ( $n= 6$ ; 85.71 %), *Pancratium*



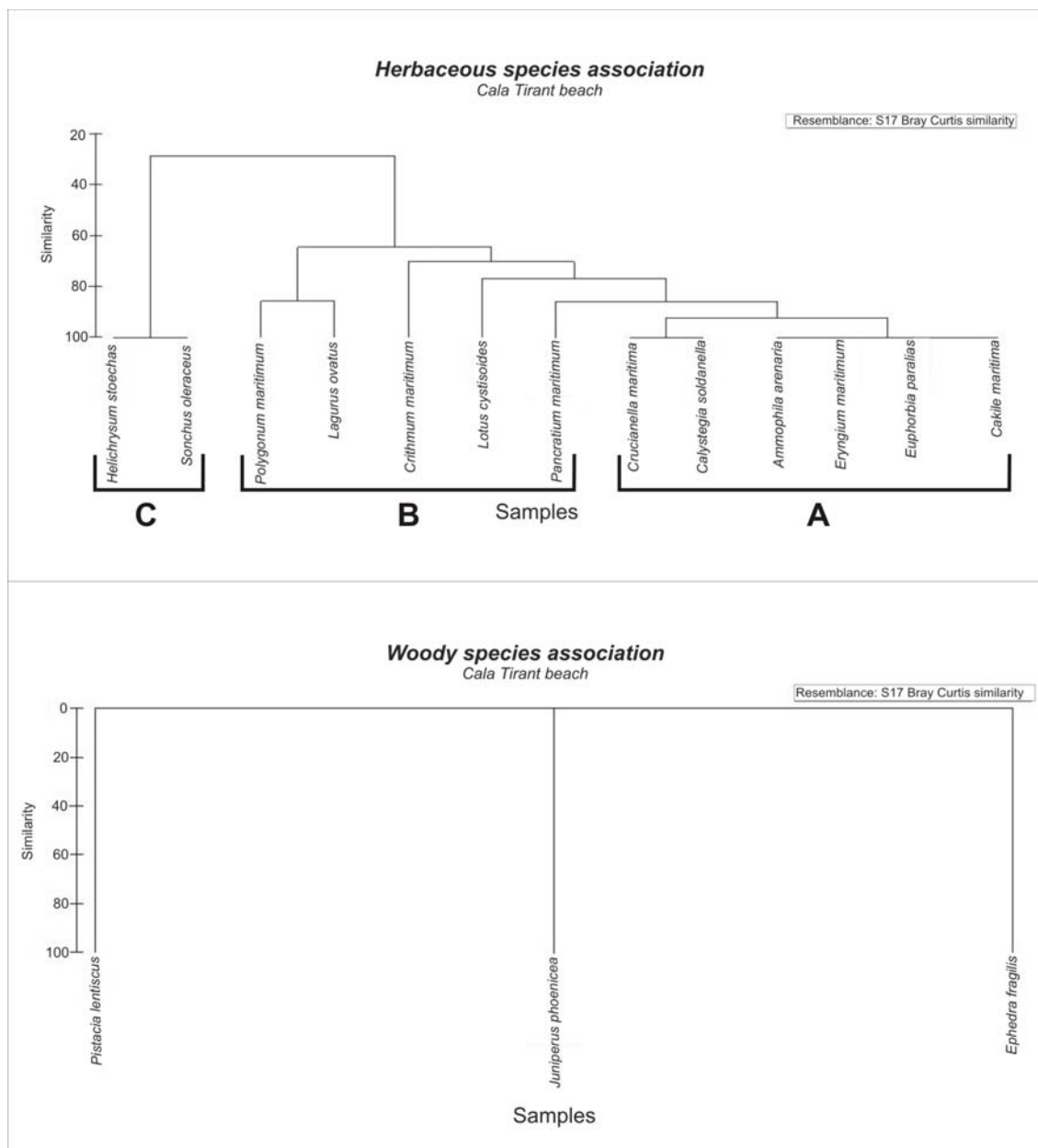
*maritimum*, *Lotus cytisoides* (n= 5; 71.43 %), o *Crithmum maritimum* i *Lagurus ovatus* (n= 4; 57.14%). Finalment, les espècies amb manco pes són *Polygonum maritimum* (n= 3; 42.86 %), i *Helichrysum stoechas* i *Sonchus oleraceus*, només amb presència a un *blowout* i representant el 14.29 % sobre el total de la mostra. Si s'analitza la presència de les espècies identificades en termes absoluts es veu una homogeneïtat notable en aquest cas, no obstant amb algunes diferències a considerar; e.g. la diferència entre el pes d'espècies com *Ammophila arenaria* i d'altres com *Helichrysum stoechas* o *Sonchus oleraceus* (Figura 125).

<b>Espècies herbàcies</b>	<b>Total</b>	<b>%</b>
<i>Ammophila arenaria</i>	7	100,00
<i>Eryngium maritimum</i>	7	100,00
<i>Pancratium maritimum</i>	5	71,43
<i>Lotus cytisoides</i>	5	71,43
<i>Euphorbia paralias</i>	7	100,00
<i>Crucianella maritima</i>	6	85,71
<i>Helichrysum stoechas</i>	1	14,29
<i>Crithmum maritimum</i>	4	57,14
<i>Cakile maritima</i>	7	100,00
<i>Calystegia soldanella</i>	6	85,71
<i>Sonchus oleraceus</i>	1	14,29
<i>Polygonum maritimum</i>	3	42,86
<i>Lagurus ovatus</i>	4	57,14

**Taula 37:** Espècies herbàcies identificades al llarg dels 7 *blowouts* analitzats a Cala Tirant. Es mostra la seva recurrència en termes absoluts i percentuals sobre el total de la mostra.



**Figura 125:** Recurrència, en termes absoluts, de les espècies herbàcies principals al front dunar de Cala Tirant.



**Figura 126:** Agrupacions de les espècies vegetals identificades i mostrejades al front dunar Cala Tirant a partir de la seva presència/absència en cada una de les morfologies. Les anàlisis *clusters* o dendrogrames han estat realitzades a partir de l'índex *Bray Curtis similarity*. A la part superior (A) es mostren les agrupacions derivades de les espècies herbàcies existents, mentre que a la part inferior de la imatge (B) es fa el propi amb el cas de les espècies llenyoses o arbustives

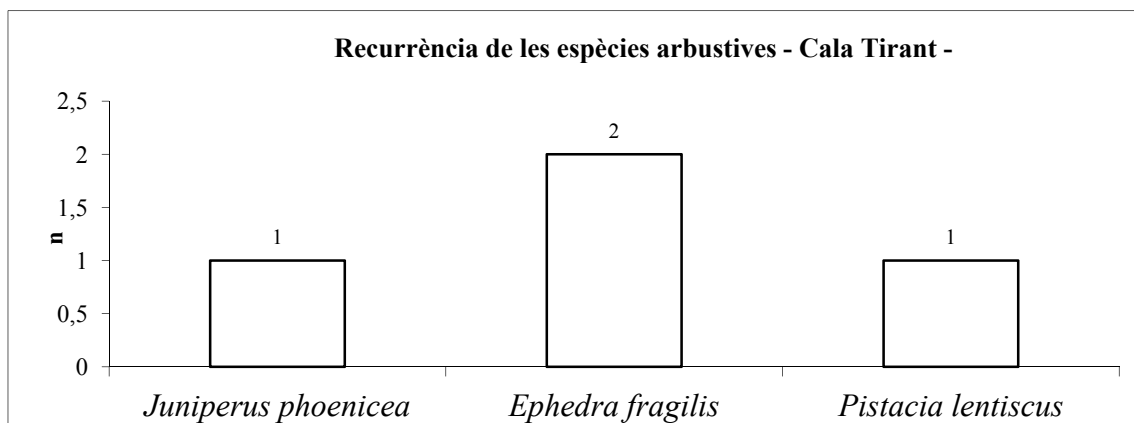
En termes generals els patrons de similitud entre les 13 espècies herbàcies identificades són alts, oscil·lant majoritàriament entre el 60-100 % (Figura 126, superior). D'una anàlisi més detallada se'n poden diferenciar tres grups; un primer (A) format per aquelles espècies que presenten un alt grau de recurrència i que coincideixen entre sí en el 100 %. Aquest primer grup queda íntimament connectat a un segon (B) que presenta també alts patrons de similitud entre les espècies que el formen, amb valors d'entre el 60 i 82%. Algunes espècies d'aquest primer grup, com pugui ser

*Pancratium maritimum*, queden relacionades amb el primer grup (A) amb valors superiors al 80 %. Finalment un tercer grup (C), format sols per dues espècies (*Helichrysum stoechas* i *Sonchus oleraceus*) que, entre elles mantenen un ordre de similitud del 100%, però que en canvi gairebé no es relacionen amb la resta.

La situació canvia en tant al grup de les espècies llenyoses o arbustives. L'alt dinamisme existent al front dunar, principalment dominat per morfologies mòbils i per una escassa cobertura vegetal, fa que les espècies de característiques llenyoses hi siguin gairebé absents. Aquest fet queda demostrat amb la poca diversitat trobada, sols representada per 3 espècies, i per la seva poca presència i recurrència (Taula 38 i Figura 127). En aquest cas *Ephedra fragilis* és la que més pes té, però sols localitzant-se en dos dels *blowouts* mostrejats, suposant el 28.57 %. D'altra banda *Juniperus phoenicea* i *Pistacia lentiscus*, sols identificades a un *blowout* i amb un pes relatiu del 14.29 %.

Espècies arbustives	Total	%
<i>Juniperus phoenicea</i>	1	14,29
<i>Ephedra fragilis</i>	2	28,57
<i>Pistacia lentiscus</i>	1	14,29

**Taula 38:** Espècies llenyoses identificades al llarg dels 7 *blowouts* analitzats a Cala Tirant. Es mostra la seva recurrència en termes absoluts i percentuals sobre el total de la mostra.



**Figura 127:** Recurrència, en termes absoluts, de les espècies llenyoses identificades al front dunar de Cala Tirant.

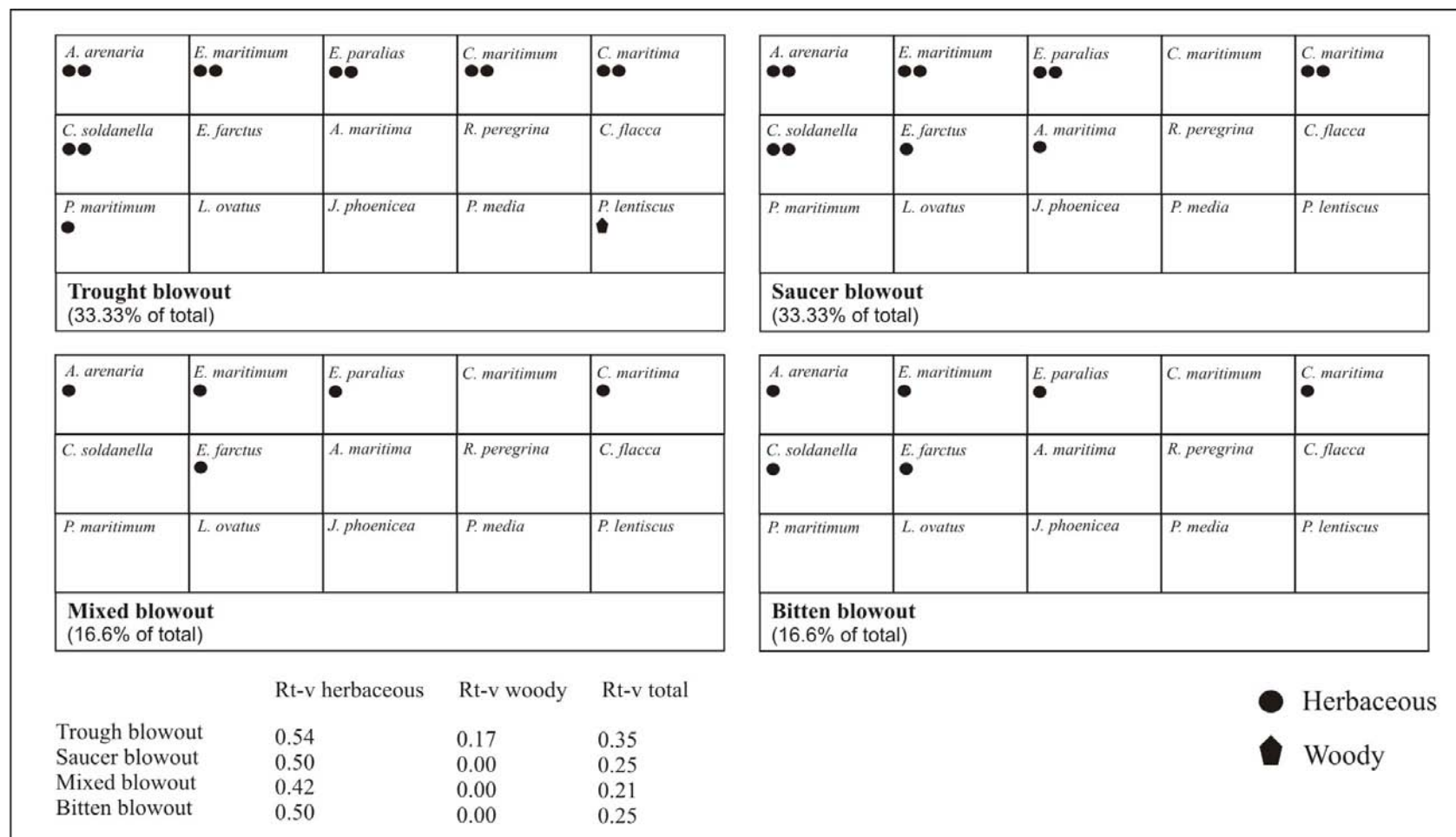
La poca diversitat d'espècies arbustives, i la seva escassa presència sobre el total de la mostra analitzada en aquest cas fa que l'escenari d'associacions entre elles sigui molt pobre. De fet, el patró de similitud entre elles en tant a la presència/absència en els diferents *blowouts* és inexistent, ja que no coincideixen en cap dels casos (0%) (Figura 126, inferior).

### 3.2.1.2.6. Patrons de relació botànica-geomorfològica

La simplificació de la diversitat taxonòmica en aquest cas d'estudi fa també que l'escenari de relacions amb cada una de les tipologies de *blowouts* sigui molt més simple. Si es contempla sols en termes absoluts, com mostra la Figura 128, sembla ser que hi ha una major relació de les espècies vegetals, sobretot de les herbàcies, amb les tipologies de *trough blowouts* i *saucer blowouts*. No obstant, i com ja ha estat comentat amb anterioritat, aquest fet és normal si es pensa que el pes relatiu d'aquestes dues tipologies (33.33%) és superior al que presenten les formes mixtes i els *bitten blowouts* (16.16%). En aquest sentit, per tal de relativitzar i estandarditzar aquesta relació s'aplica l'índex  $R_{t-v}$  (Taula 39) el qual mostra una notable homogeneïtat vers a la relació vegetació-tipologies.

$R_{t-v}$	Trough blowout	Saucer blowout	Mixed blowout	Bitten blowout
<i>Ammophila arenaria</i>	1	1	1	1
<i>Eryngium maritimum</i>	1	1	1	1
<i>Euphorbia paralias</i>	1	1	1	1
<i>Crithmum maritimum</i>	1	0,0	0	0
<i>Cakile maritima</i>	1	1	1	1
<i>Calystegia soldanella</i>	1	1	0	1
<i>Elymus farctus</i>	0	0,5	1	1
<i>Athenensis maritima</i>	0	0,5	0	0
<i>Rubia peregrina</i>	0	0,0	0	0
<i>Carex flacca</i>	0	0,0	0	0
<i>Polygonum maritimum</i>	0,5	0,0	0	0
<i>Lagurus ovatus</i>	0	0,0	0	0
<b>Herbaceous-tipologies</b>	<b>0,54</b>	<b>0,50</b>	<b>0,42</b>	<b>0,50</b>
<i>Juniperus phoenicea</i>	0	0,0	0	0
<i>Phillyrea media</i>	0	0,0	0	0
<i>Pistacia lentiscus</i>	0,5	0,0	0	0
<b>Woody-tipologies</b>	<b>0,17</b>	<b>0,0</b>	<b>0,0</b>	<b>0,0</b>

**Taula 39:** Valors derivats de l'aplicació de l'índex 0-1  $R_{t-v}$  per a tal de determinar els patrons de relació reals entre les espècies vegetals identificades i les tipologies de *blowout* al sistema de Cala Tirant.



**Figura 128:** Representació gràfica del pes que cada una de les espècies – en termes absoluts – presenten en les diferents tipologies existents al llarg dels *blowouts* a Cala Tirant. En aquest cas el número de punts associats a cada espècia representa la seva presència vers a cada una de les tipologia.

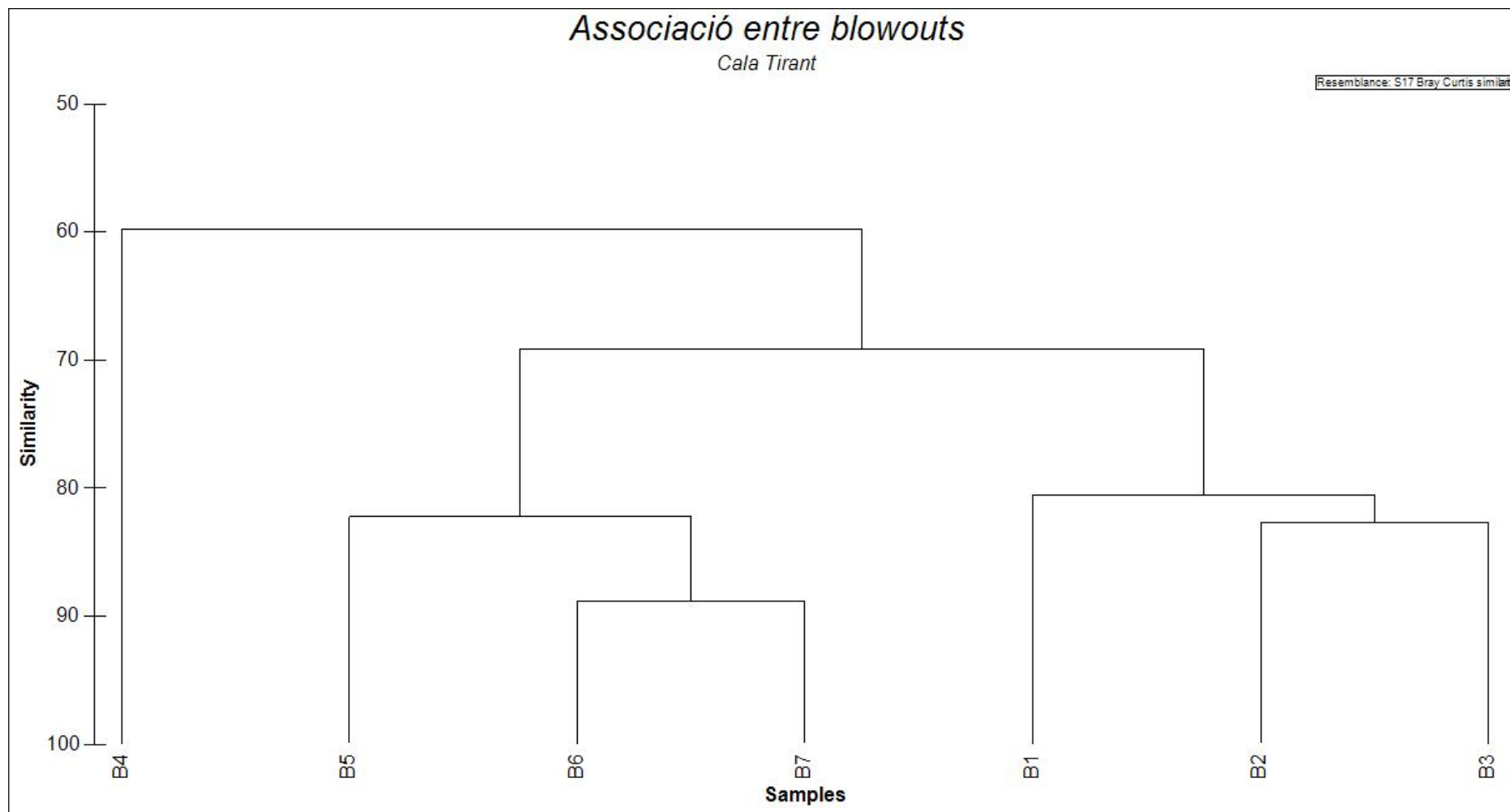
Hi ha una important homogeneïtat en tant a la relació entre les diferents tipologies de *blowout* i les espècies herbàcies. En efecte els *trough blowouts* és la tipologia que major relació té amb  $R_{t-v} = 0.54$ . No obstant, amb valors semblants hi trobem els *saucer blowout* i els *bitten blowouts*, amb dues amb valors de  $R_{t-v} = 0.50$ . Finalment les formes mixtes – *mixed shape* – és la tipologia que manco es relaciona amb la vegetació herbàcia, amb  $R_{t-v} = 0,42$ . Si es fa l'anàlisi sols per espècies, les més recurrents (e.g. *Ammophila arenaria*, *Eryngium maritimum*, etc.) mostren una relació forta amb la major part o totalitat de les categories, amb  $R_{t-v} = 1$ . D'altra banda, les manco recurrents (*Lagurus ovatus*) mostren una relació gairebé nul·la.

El cas de les espècies llenyoses no suggereix comentaris en aquest cas, ja que la poca presència i diversitat d'aquestes espècies fa que la seva relació amb les diferents tipologia de *blowouts* sigui absent.

#### 3.2.1.2.7. Caracterització i agrupació integrada dels *blowouts*

L'anàlisi *cluster* resultant de totes les variables analitzades al llarg de tot el procés de caracterització dels *blowouts* a Cala Tirant suggereix un escenari força homogeni vers als patrons de similitud entre els distints punts de mostreig, no obstant amb una tendència notable de similitud (Figura 129). En termes generals s'identifiquen dos grups de *blowouts* (BOT1, 2, 3 i BOT5, 6, 7) que es relacionen entre sí amb nivells de similitud superiors al 80%. Endemés els dos grups mantenen una associació lleugerament inferior al 70%. D'altra banda, el BOT4 (el que ha quedat segellat i recuperat) queda una mica al marge de la resta, relacionant-se en un 60%.

A nivell individual el màxim grau d'associació es localitza entre el BOT6 i BOT7, marcat en el 88.8 %, destacant també la similitud entre BOT3 i BOT2, amb un 82.7%. El mínim valor de similitud el localitzem entre BOT4 i BOT6, amb un 50% de similitud, mencionant també les baixes relacions entre BOT2 i BOT4, o BOT6 i BOT4, marcades ambdues en el 56%. Així, es veu com en els tres casos representatius de les relacions més baixes entre els *blowouts* analitzats en aquest cas, BOT4 n'és el denominador comú.

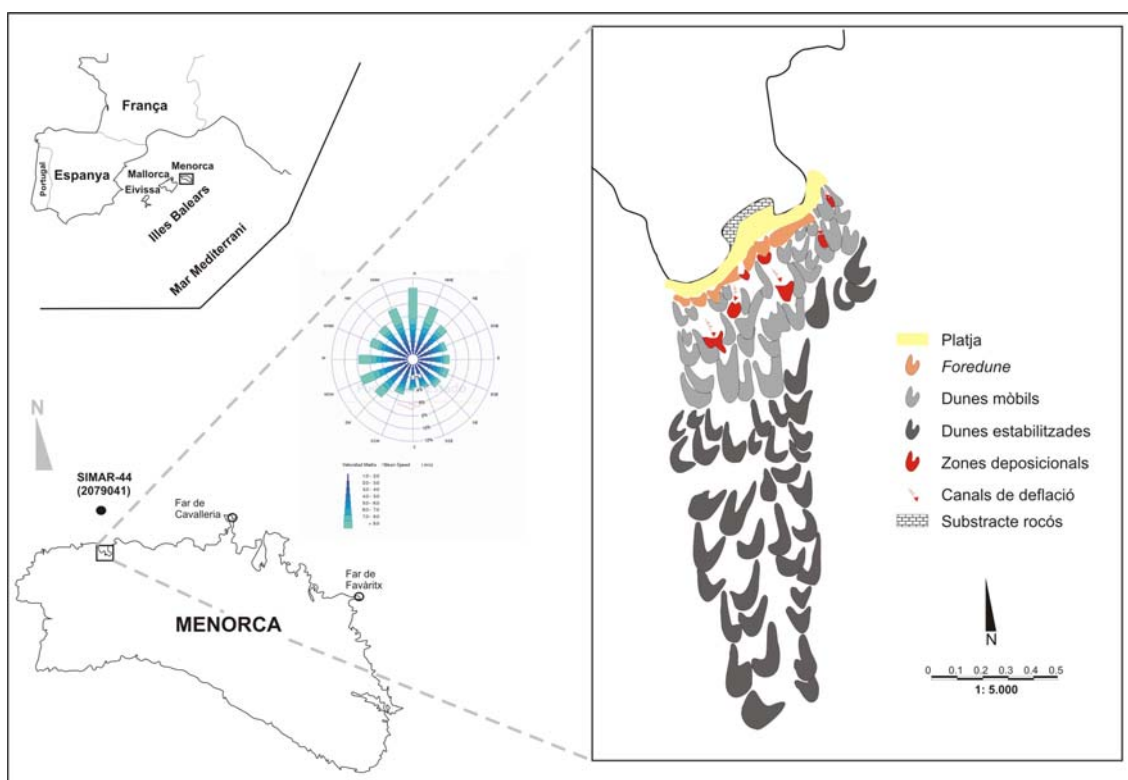


**Figura 129:** Anàlisi cluster dels 7 *blowouts* analitzats a Cala Tirant a partir de la consideració de les seves característiques geomorfològiques, ecològiques i estat de gestió..

### 3.2.2. Sistema dunar de La Vall

#### 3.2.2.1. Localització i caracterització geogràfica del sistema

El sistema platja-duna de La Vall es localitza al quadrant nord occidental de l'illa de Menorca, a la costa de Tramuntana i exposat als vents de la mateixa component (Figura 130). Des del punt de vista administratiu es troba dins el municipi de Ciutadella. Físicament es troba dividit per un escull o sortint rocós el qual separa la cala en dos sectors, el més occidental conegut com es Tancats, i el més oriental, sota el topònim d'Es Bot. Aquesta tesi es centrarà amb la caracterització de les formes *blowout* existent al sector més occidental, el corresponent a Els Tancats. Tot i que és un sistema relativament fixat per la presència de vegetació, la tendència mostrada al llarg dels darrers anys incita a pensar en processos actius que ajuden a la reactivació del sistema dunar, o almenys a una part d'ell.

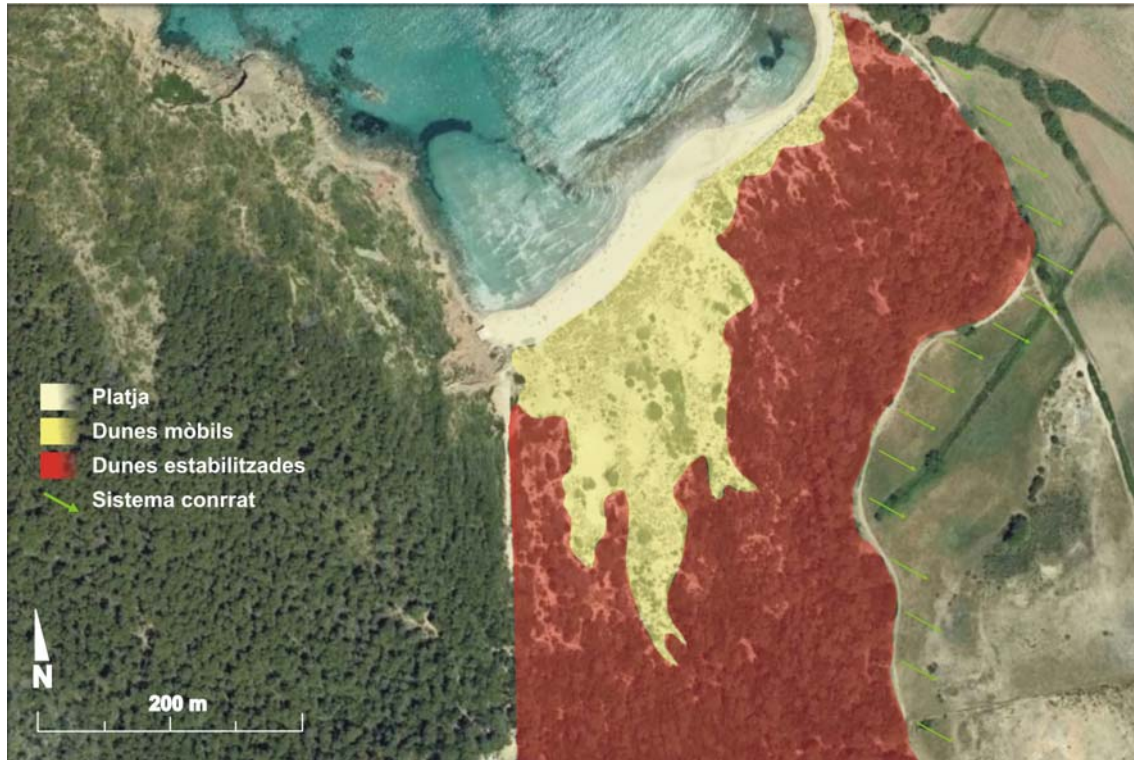


**Figura 130:** Localització geogràfica del sistema platja-duna de La Vall, i representació de les característiques geomorfològiques del sistema dunar.

El sistema dunar a la platja d'es Tancats es desenvolupa a partir d'una línia de costa d'uns 400 m de longitud, dels quals sols 275 m són de platja arenosa, ja que a la



part central hi ha un aflorament rocallós que romp amb la continuïtat. Avui dia és tasca un tant imprecisa determinar la profunditat del sistema dunar terra endins, primer per la modificació del mateix a partir de la seva desforestació per a terres de conreu (Figura 131), i en segon lloc, pel mosaic actual del sistema fixat per pinar. A nivell d'aproximació aquest s'endinsa fins a uns 800 m terra endins, en el seu axis principal, i dels quals la majoria formen part del sistema dunar consolidat.



**Figura 131:** Sectorització del sistema platja-duna de La Vall en el sector de la platja des Tancats (Menorca).

L'organització dels sectors que conformen el sistema platja-duna de La Vall són avui prou identificables, emperò amb algunes diferències des del punt de vista geomorfològic i organitzatiu. Així la Figura 131 reflecteix com el sector de dunes mòbils es desenvolupa en cordons paral·lels a la línia de costa que els alimenta – seguint el patró característic dels sistemes dunars de les Balears –, mentre que en el cas de les dunes estabilitzades aquest es desenvolupa seguint una trajectòria perpendicular. A nivell organitzatiu l'estructura mostrada en aquest cas és força simple (Figura 130). De la platja emergida es passa directament al cordó de dunes mòbils, sent absent una línia de *foredune* ben definida. No obstant, en alguns casos, sobretot aprofitant els canals de deflació existents a l'interior, es reproduïxen algunes morfologies típiques

de primera línia tals com *shadow dunes* o *echo dunes*. En aquest cas el sector de dunes mòbils té unes dimensions importants, sobretot a la franja occidental del sistema, a on es desenvolupa notablement terra endins. Aquesta és doncs la zona que avui incita a pensar en alguns processos de reactivació del sistema, mostrant signes de processos sedimentaris evidents. Finalment, es troba un ampli sector de dunes estabilitzades per una gran massa boscosa, principalment de *Pinus halepensis*, seguit de les actuals terres de conreu les quals responen a processos de desforestació interessada (Figura 131). Seguint el que postulen Roig-Munar et al. (2009) l'alteració antròpica en aquests casos tenia una finalitat basada amb fixar els sistemes dunars per tal d'aturar el seu avanç, fet que permet intuir que aquest, sota condicions naturals, esdevé un sistema intensament actiu.

#### 3.2.2.1.1. Sector de dunes mòbils o semiestabilitzades

Tal i com s'ha esmentat anteriorment, la gradació a la part frontal del sistema dunar de La Vall passa directament de la platja al sector de dunes mòbils – sent per tant impossible identificar un cordó de *foredunes* ben definit – (Figura 131). Segons Servera (1997) el sector de dunes mòbils presenta notables diferències entre la platja d'es Bot i la unitat des Tancats. Aquestes són resultat fonamentalment de dos aspectes: en primer lloc, la barrera al transport de sediment que suposa la zona permanentment inundada per aigua en el primer sector, mentre que en segona instància ho atribueix a la major exposició d'es Tancats als vents predominants de component nord.



**Figura 132:** Imatge panoràmica del sector de dunes mòbils a la part oriental de la platja d'es Tancats, al sistema platja-duna de La Vall (Menorca).

En el sector d'es Tancats les dunes mòbils ocupen una superfície aproximada a les 4.8 ha, que penetren de cap a l'interior a una distància d'uns 230 m des de la línia de costa. Atenent la incidència del flux eòlic predominant el desenvolupament d'aquestes s'amplia des del sector oriental de la platja cap a l'occidental (Figura 130). A conseqüència de la incidència eòlica, a la part occidental, a on aquest sector està més desenvolupat, apareixen superfícies d'arena lliure, amb una àrea aproximada als 2.000 m<sup>2</sup> i que presenten signes evidents de deflació sedimentària i reactivació del sistema (Figura 131 i 132). Des del punt de vista ecològic, destacar l'alta i predominant colonització d'*Ammophila arenaria*, amb poca presència de vegetació amb característiques arbustives o llenyoses (Figura 132).

En conjunt les formes simples mantenen una direcció en els seus eixos que oscil·la entre els 146°-191°. La relació que existeix entre la longitud i l'amplada dels seus braços s'emmarca entre 0.5 i 2, el que permet classificar-les com a parabòliques de forma *hemicyclic* i *lobate*. No obstant, el 56% d'aquestes morfologies, pel seu grau d'elongació, corresponen al grup de les *lobate*. En tant a les formacions compostes aquestes es corresponen a la tipologia *en-echelon* – rampí – i *superimposed* – superposades –. Les seves potències poden distar molt, encara que es poden trobar entre els 3-10 m, amb les màximes localitzades precisament al sector d'els Tancats (Servera, 1997).

#### 3.2.2.1.2. Sector de dunes estabilitzades

En la franja d'es Tancats el sector de dunes estabilitzades es presenta ben estructurat. Actualment aquest ocupa una superfície aproximada a les 12.7 ha, i penetren de cap a l'interior a una distància de 800 m des de la línia de costa. Cal apuntar que, actualment, aquest sector constitueix la continuació de la part occidental, més dinàmica i extensa, del sector de dunes mòbils d'aquesta unitat, fet que recolza la idea de que el flux eòlic afecta amb diferent intensitat una meitat i l'altra del conjunt d'aquesta platja. En conjunt les morfologies simples d'aquest sector presenten un ampli ventall de direccions dels seus eixos centrals (Figura 130), que van entre els 11° i els 236°. La relació que existeix entre la longitud i amplada dels seus braços es fixa entre 0.5 i 3, classificant-les com a parabòliques de forma *hemicyclic* i *lobate*. En tant a les morfologies compostes aquestes s'organitzen principalment en morfologies

*superimposed* – superposades –, tot i que també se n'identifiquen algunes de digitades – *digitate* – (Servera, 1997). L'estabilització d'aquest sector es dona principalment pel desenvolupament massiu d'una massa forestal encapçalada per la presència de *Pinus halepensis*, i que segons Roig-Munar et al. (2009) ha estat impulsada i accelerada per pràctiques de repoblació – antròpica – (Figura 133A).



**Figura 133:** Imatges del sector de dunes estabilitzades a la platja des Tancats, al sistema platja-duna de La Vall (Menorca). A l'esquerra (A) es veu la fixació i estabilització de les dunes pel bosc de *Pinus halepensis*, mentre que a la dreta (B) es percep l'alteració antròpica soferta per aquest sector a conseqüència de la desforestació en tant a l'obtenció de nous camps de conreu.

Finalment, els límits que actualment presenten les morfologies estabilitzades és el resultat del control de l'home, a partir de la pressió agrícola i ramadera exercida a la zona. En aquest cas, la desforestació ha estat latent al llarg de dècades per a tal d'obtenir noves terres aptes per al conreu i la pastura, tot en detriment del sistema de dunes consolidades (Figura 133B).

### 3.2.2.1.3. Caracterització climàtica

En aquest cas, deguda la proximitat geogràfica d'ambdós sistemes, i sobretot de la seva exposició a Tramuntana, la caracterització climàtica de La Vall gairebé no dista de la descrita en el cas de Cala Tirant. Així la precipitació anual a la zona es situa entorn als 600 mm. Els vents principals són els de component nord – Tramuntana –, predominants en més d'un 10% dels dies entre el període 1958-2001, 6% dels quals foren amb velocitats superiors als  $8 \text{ ms}^{-1}$  (boia SIMAR-44, 2079041, [www.puertos.es](http://www.puertos.es)) (Figura 130). No obstant, i d'acord a la irregular morfologies presentada per la costa nord de Menorca, hi ha altres direccions que nos es poden menysprear a l'hora de

considerar-les tals com NNE o NNO, que en mateix període de temps també presenten una importància rellevant sobre el total de la mostra.

En aquest cas, també el règim és micromareal amb una oscil·lació inferior a 0.25 m. Les estimacions en el període 1960-2001 indiquen altures d'ona superior a 1 m en el 30% dels dies, i amb períodes de recurrència d'entre 3-7 s. (boia SIMAR-44, [www.puertos.es](http://www.puertos.es)). En períodes altament energètics les ones poden superar altures de 5 m, principalment existents al llarg del període hivernal i derivades de grans temporals de tramuntana. A l'igual que succeeix amb els vents, la direcció principal de l'onatge és de nord, no obstant, i deguda la morfologia de la costa nord de l'illa, altres direccions també hi poden ser presents; e.g. NO o NE.

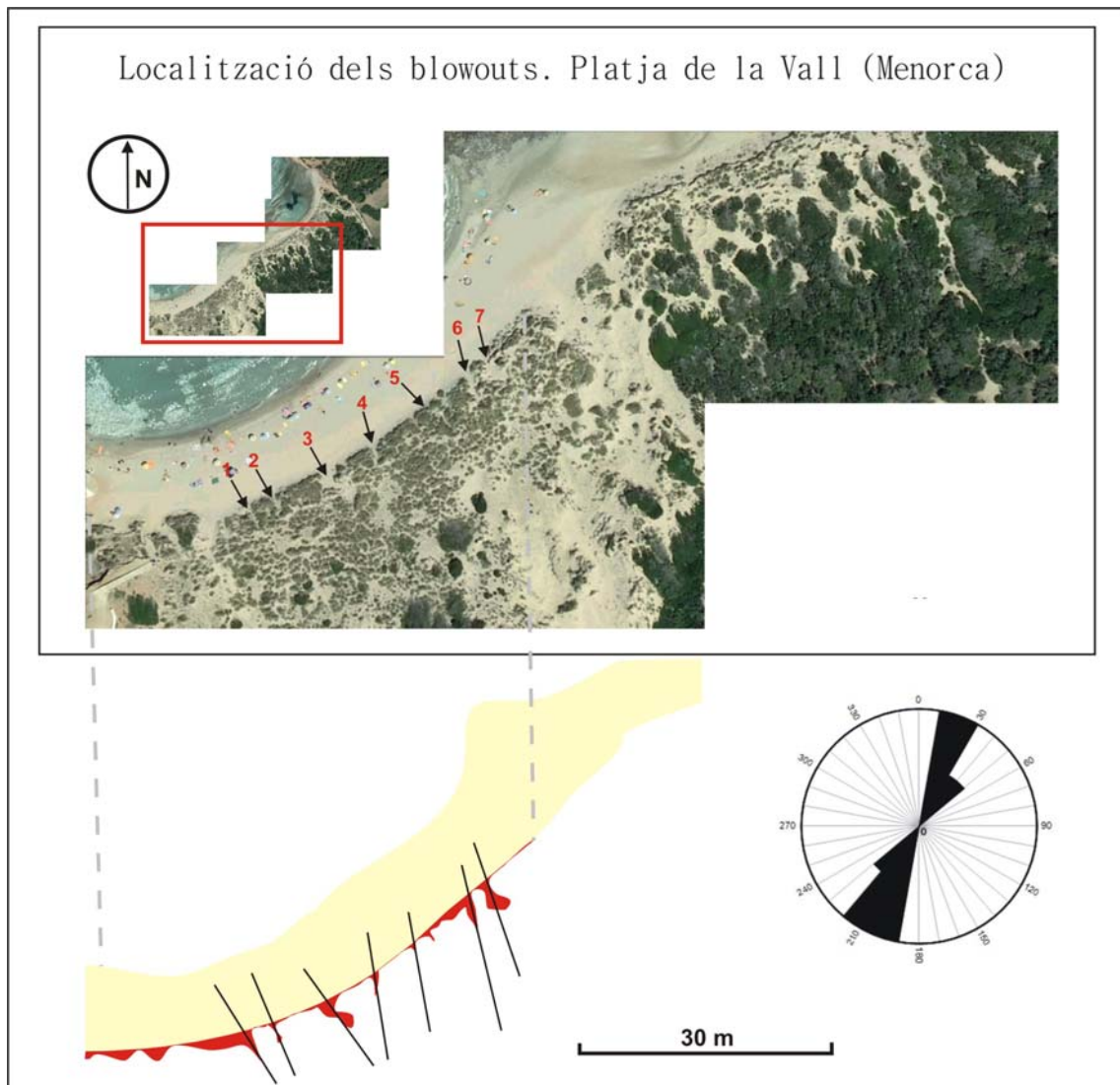
### 3.2.2.2. *Les morfologies dunars al sistema de La Vall. Resultats*

Com s'ha dit el present treball es centra sols en analitzar les morfologies *blowout* existents al sector occidental de la platja d'es Tancats, aquell que des del punt de vista geomorfològic és el més actiu actualment. Així, al llarg d'una línia de front dunar d'uns 200 m de longitud s'hi identifiquen un total de 7 morfologies, les quals es generen directament sobre la primera línia de duna mòbil – recordem que en aquest cas no existeix la presència de *foredune* –.

En termes generals, i com es desenvoluparà amb més extensió posteriorment, les dimensions de les morfologies no són notables. Aquestes presenten una distribució més o manco homogènia (Figura 134). Als dos extrems del sector analitzat es percep una lleugera proximitat entre les morfologies que s'hi localitzen, mentre que a la part central la densitat d'aquestes disminueix. Tanmateix, en una distància com l'analitzada, i amb els pocs *blowouts* considerats, esdevé una tasca un tant superficial fer valoracions fermes sobre la seva distribució i/o densitat. En termes quantitius, la densitat en aquest cas queda fixada en 0.035 *blowouts*/m, indicant de qualsevol manera que aquesta no esdevé elevada.

En aquest cas d'estudi no es perceben tampoc zones altament degradades, caracteritzades per alts valors de fragmentació geomorfològica i/o ecològica. No obstant, al igual que Servera (1997) els identifica a la part interior del sistema dunar, es poden diferenciar algunes zones deprimides en primera línia les quals esdevenen com a corredors de deflació, però que des del punt de vista dinàmic i topogràfic no es

presenten com a *blowouts* (e.g. veure a la Figura 134 el sector localitzat a la part oriental del BOL7).



**Figura 134:** Fotografia aèria de la platja i el front dunar del sector d'es Tancats, al sistema de La Vall (Menorca). A la part superior de la figura es representen damunt fotografia aèria les localitzacions dels *blowouts* analitzats en aquest cas, mentre que a l'esquema inferior es traça la seva orientació, acompanyada de la rosa de direccions predominants.

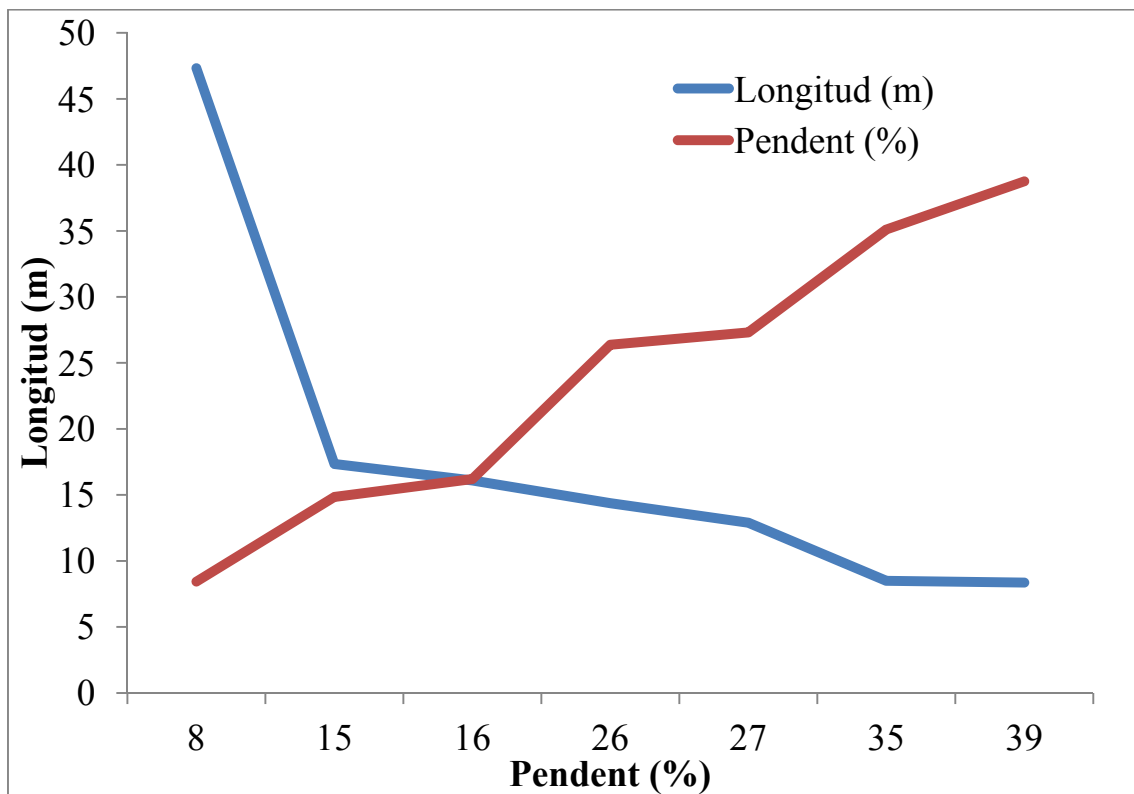
### 3.2.2.2.1. Dimensió i gradients de pendents dels *blowouts* analitzats

Les dades referents a la longitud, pendent i desnivell dels 7 *blowouts* analitzats a la platja d'es Tancats es resumeixen a la Taula 40. La longitud mitjana de les morfologies en aquest cas es fixa en 17.84 m, amb la màxima al BOL7, amb 47.33 m i la mínima al BOL2, sols amb 8.36 m. En referència al desnivell mitjà aquest es situa en els 3.25 m. En aquest cas la màxima es torna a trobar al BOL7, amb gairebé 4 m, i la

mínima es localitza al BOL3, fixada en 2.39 m. Finalment, pel que fa a el pendent, la mitja es situa en el 23.8 %, sent el BOL2 el que major pendent contempla, concretament del 38,76 %, i el BOL7 el de menor, fixada en el 8,43 %.

	Longitud (m)	Desnivell (m)	Pendent (%)
BOL1	17,34	2,81	16,21
BOL2	8,36	3,24	38,76
BOL3	16,10	2,39	14,84
BOL4	8,49	2,98	35,10
BOL5	12,89	3,52	27,31
BOL6	14,37	3,79	26,37
BOL7	47,33	3,99	8,43
<b>Mitjana</b>	<b>17,84</b>	<b>3,25</b>	<b>23,86</b>

**Taula 40:** Pendent, longitud (m) i desnivell (%) per a cada una de les morfologies *blowout* analitzades a la platja d'es Tancats, al sistema de La Vall.



**Figura 135:** Gràfic de correlació entre la longitud i la pendent dels 7 *blowouts* caracteritzats a La Vall.

Si s'analitzen les correlacions de *Pearson* entre les variables considerades en aquest cas es pot observar com hi ha certes diferències. En el cas entre la longitud i el desnivell aquesta es fixa en  $r= 0.5$ , mentre que pel que fa a la longitud i el pendent el

resultat és de  $r = -0.7$ . En el primer cas existeix una correlació positiva, és a dir, una relació directa entre ambdues variables. Així, quan una de les variables augmenta l'altra ho fa en una proporció constant. Si s'analitza sobre el conjunt de la mostra, un exemple que reflecteix aquesta relació és el BOL7, el qual amb la màxima longitud també presenta el màxim desnivell (Taula 40). Al contrari, el segon cas presenta una correlació negativa o relació inversa, indicant doncs que a mesura que una variable augmenta l'altra disminueix de manera proporcional. Aquest cas queda de nou nítidament representat pel BOL7, mostrant una distància considerable entre la longitud i el pendent presentada (Taula 40).

La tendència mostrada per la Figura 135 reflecteix, al igual que en els casos estudiats fins al moment, que amb longituds dels *blowouts* elevades la pendent tendeix a ser baixa, mentre que en el cas contrari, els *blowouts* amb pendents més acusades es caracteritzen per a tenir longituds inferiors.

#### 3.2.2.2.2. Orientació dels *blowouts*

L'orientació estructural de la cala en aquest cas sembla tornar tenir un paper clau, primer en la incidència dels vents predominants de N (Figura 130), i en segon lloc en el desenvolupament del sistema dunar i dels *blowouts* existents en ell (Figura 134). Es presenta així una situació molt homogènia vers a les orientacions traçades en cada una de les morfologies analitzades, imperant al 100% les orientacions NNE-SSO (Taula 41). En termes generals la orientació mitjana dels 7 *blowouts* es situa en els  $28.2^\circ$ , xifra que reflecteix la seva clara exposició a Tramuntana.

BO	Graus	Direcció
1	37	NNE-SSO
2	25	NNE-SSO
3	14	NNE-SSO
4	19	NNE-SSO
5	37	NNE-SSO
6	24	NNE-SSO
7	42	NNE-SSO

**Taula 41:** Direccionalitat de les morfologies *blowout* analitzades a la platja d'es Tancats (La Vall).



3.2.2.2.3. *Morfometria i topografia interna*

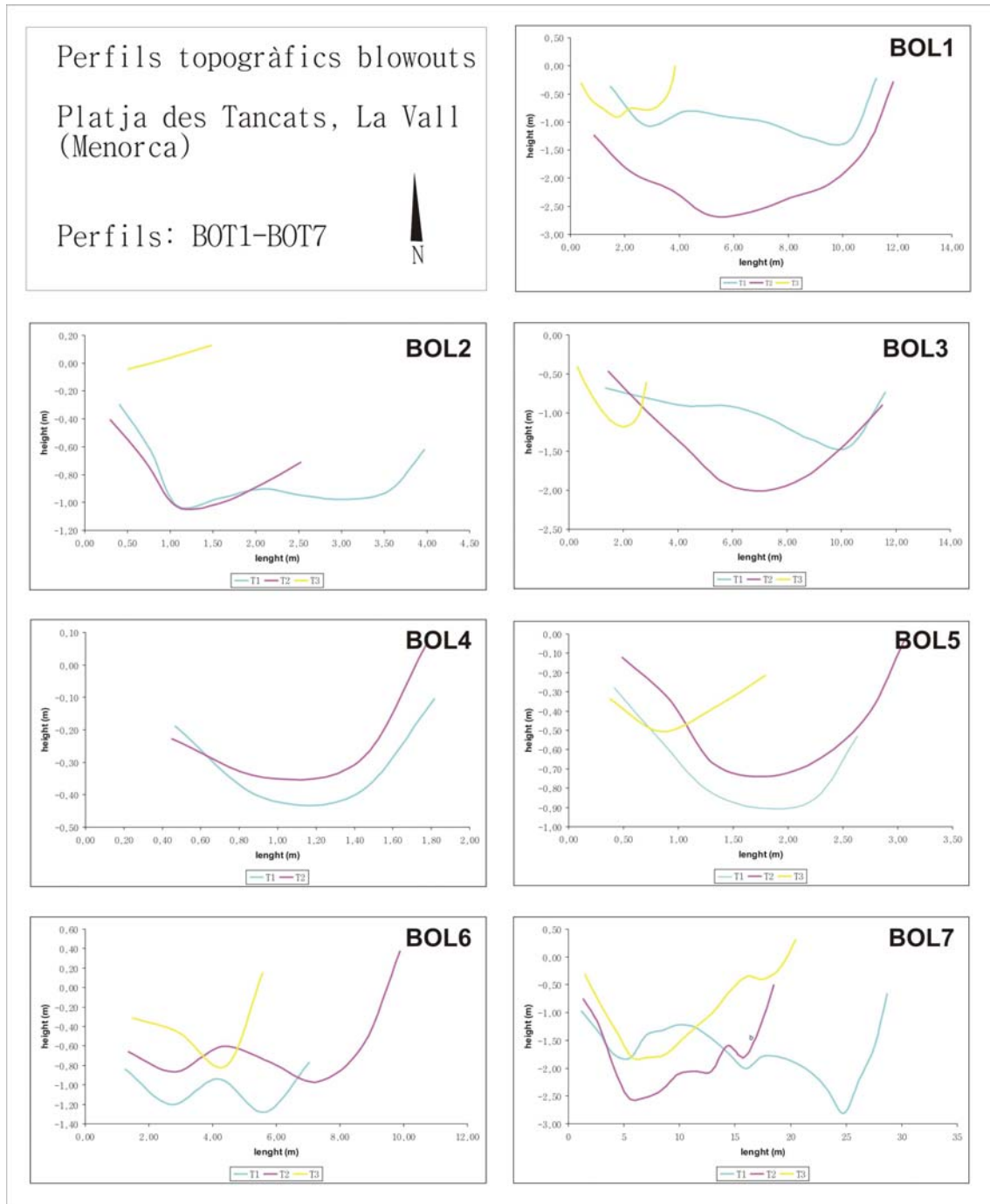
En termes generals les dimensions del 7 *blowouts* analitzats disminueixen des de la seva boca cap a l'interior. Aquest patró queda plasmat quantitativament per la Taula 42, a on es veu com la longitud mitjana de T1 és de 9.57 m, la de T2 de 8.45 m, i finalment la de T3 es situa en els 5.15 m. Si es fa una anàlisi individual, la màxima longitud en cada un dels transsectes la es troba al BOL7 (el de major dimensions; veure Figura 134) amb valors de T1= 28.70 m, T2= 18.47 m, i T3= 20.47. Apuntar aquí també que en aquest cas el patró general no es segueix, ja que les dimensions augmenten a la part interior del *blowout*, indicant la presència d'una zona deposicional. Pel que fa a les mínimes, a T1 i T2 aquesta es localitza al BOL4, amb sols 1.82 m i 1,78 m respectivament, mentre que a T3 es troba al BOL2, amb 1.48 m.

	Longitud (m)	T1	T2	T3
BOL1	17,34	11,23	11,87	3,85
BOL2	8,36	3,97	2,53	1,48
BOL3	16,10	11,62	11,53	2,85
BOL4	8,49	1,82	1,78	0,00
BOL5	12,89	2,63	3,06	1,80
BOL6	14,37	7,05	9,89	5,57
BOL7	47,33	28,70	18,47	20,47
<b>Mitjana</b>	17,84	9,57	8,45	5,15

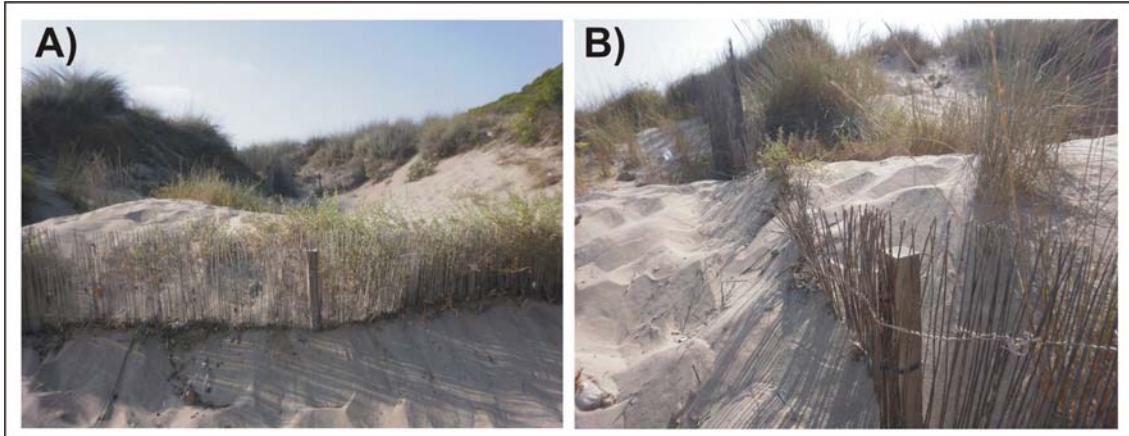
**Taula 42:** Amplada de cada un dels perfils topogràfics transversals aixecats en els *blowouts* de La Vall. En vermell apareixen els valors màxims, i en blau ho fan els valors mínims identificats.

Les morfologies analitzades en aquest cas també presenten una diversitat topogràfica notable, no sols entre sí, sinó també entre els diferents perfils aixecats en el seu interior (Figura 136). En termes generals, T1, que en altres sistemes com per exemple Cala Tirant presentava una topografia homogènia, en aquest cas suggereix una major diversitat. Si és cert que en casos com BOL4 o BOL5 presenten una topografia simple, amb una notable concavitat, en altres com BOL 6 o BOL7 aquesta és més heterogènia i complexa. Pel que fa a T2 es poden fer algunes consideracions. En primer lloc aquells *blowouts* que presenten seccions homogènies, marcades per una important concavitat i amb parets laterals escarpades; e.g. BOL4 i BOL5. En segon lloc, i pot ser el fet més destacable en aquest cas, aquells *blowouts* que presenten, al contrari, una certa convexitat en aquest punt, indicant un topografia positiva que respon als processos

de sedimentació i segellament actuals els quals deriven en un escenari de sedimentació i de la zona erosiva – canal de deflació originari –; e.g. BOL1 i BOL3. Finalment, fer esment al BOL6 i BOL7, per ser aquells que presenten una major complexitat topogràfica, així com una major diversitat entre els diferents perfils (Figura 136).



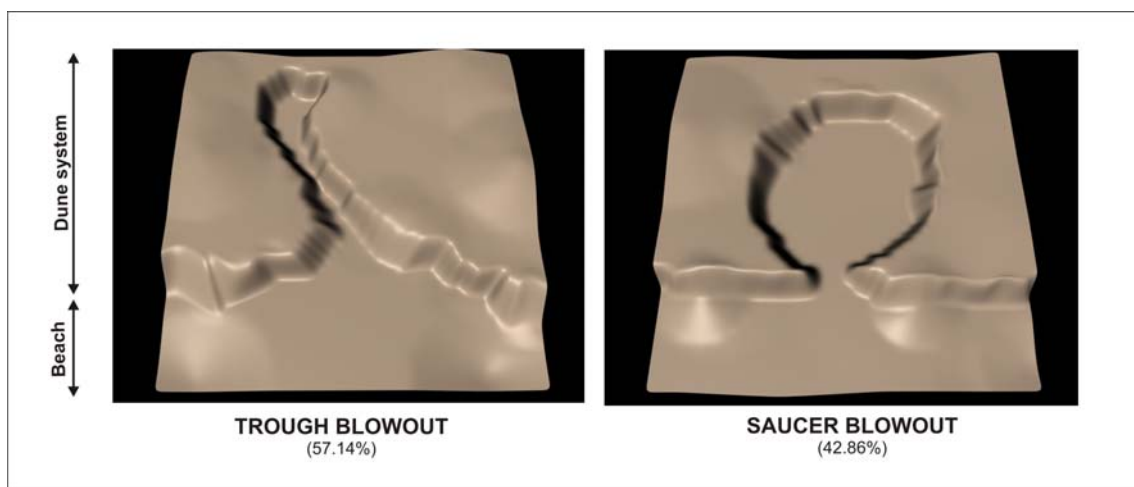
**Figura 136:** Perfils topogràfics interiors als *blowouts* de la platja d'es Tancats (La Vall).



**Figura 137:** Exemples sobre els actuals processos de sedimentació experimentats en alguna de les morfologies analitzades en el cas de La Vall, concretament en la seva part central, coincidint amb el rebliment de l'antiga cubeta de deflació. Pel que fa a la primera imatge (A) es mostra la visió en perspectiva mostrada pel BOL1 (veure el T2 del BOL1 a la Figura 136), mentre que en el segon cas (B) es dona una imatge de detall del grau de retenció sedimentària a la part central del BOL3 (veure el T2 del BOL1 a la Figura 136). Com es mostra també en les imatges, ambdues situacions responen a les mesures de gestió aplicades al llarg dels darrers anys.

#### 3.2.2.2.4. Classificació morfològica

En aquest cas, i com en el cas d'es Comú de Muro (veure epígraf 3.1.1.2.5.), només dues categories han estat identificades de l'anàlisi fotomètrica realitzada a partir de la forma presentada en planta. En aquest cas es distingeixen les morfologies *trough blowout*, les quals en són les predominants, amb un 57.14 % sobre el total, i els *saucer blowout*, amb un pes del 42.68 % (Figura 138). Pel que fa a l'estructura no es perceben diferències, sent en cada cas simple. Si és cert que casos com BOL6 i sobretot BOL7 aquesta és un tant més homogènia, condicionada també per la seva situació geomorfològica.

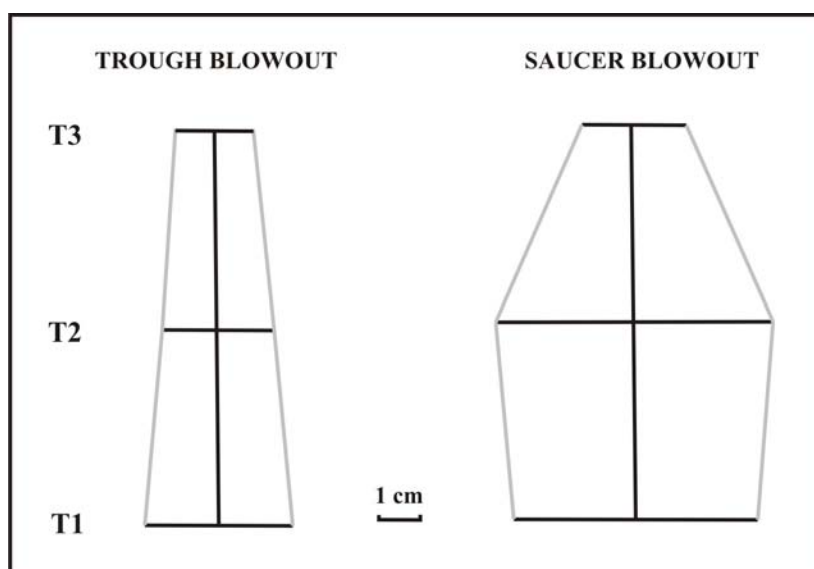


**Figura 138:** Classificació morfològica de les morfologies *blowout* al sistema de La Vall.

En aquest cas l'aplicació de l'índex  $iTx$  (explicat a l'apartat 2.2.5.) ens permet de nou corroborar la classificació anteriorment mencionada a partir de la relació quantitativa entre els diferents perfils aixecats (T1, T2 i T3) i la longitud de cada *blowout*. La Taula 43, que reflecteix els valors derivats de dita relació, mostra com la tendència en aquest cas respon amb una disminució progressiva de les dimensions des de la boca del *blowout* cap al seu interior; en el cas del *trough blowout* reflectida en  $iT1= 0.37$ ,  $iT2= 0.28$ ,  $iT3= 0.19$ , mentre que pels *saucer blowout* es fixa en  $iT1= 0.62$ ,  $iT2= 0.70$ ,  $iT3= 0.26$ , mostrant una major amplada a la part central, la qual es reflecteix amb la forma circular o semi-circular del *blowout* (Figura 139).

	$iT_x$	Lenght (m)	$iT1$	$iT2$	$iT3$	$iA$
<b>Trough BO</b>	BOL2	8,36	0,47	0,30	0,18	
	BOL4	8,49	0,21	0,21	0,00	
	BOL5	12,89	0,20	0,24	0,14	
	BOL7	47,33	0,61	0,39	0,43	
	<b>Mean</b>	<b>19,27</b>	<b>0,37</b>	<b>0,28</b>	<b>0,19</b>	<b>0,28</b>
<b>Saucer BO</b>	BOL1	17,34	0,65	0,68	0,22	
	BOL3	16,10	0,72	0,72	0,18	
	BOL6	14,37	0,49	0,69	0,39	
	<b>Mean</b>	<b>15,94</b>	<b>0,62</b>	<b>0,70</b>	<b>0,26</b>	<b>0,53</b>

**Taula 43:** Classificació morfològica dels *blowouts* de la platja d'es Tancats (La Vall) a partir de l'aplicació de l'índex  $iTx$  (veure'l a l'apartat 2.2.5.).



**Figura 139:** Representació esquemàtica a escala de la classificació morfològica a partir de l'aplicació de l'índex  $iA$  en el cas de la platja des Tancats, La Vall (relacionada amb la Taula 43).

En tant a l'àrea ponderada a partir de l'aplicació de l'índex *iA* existeix una diferència important entre ambdues categories, tal i com es reflecteix també a la Taula 43. Així, les morfologies *saucer blowout*, amb *iA*= 0.53 es mostren substancialment majors que les morfologies *trough blowout*, amb un valor inferior fixat en *iA*= 0.28. Aquesta diferència espacial queda nítidament reflectida per la Figura 139.

#### 3.2.2.2.5. Inventaris florístics i caracterització taxonòmica del front dunar

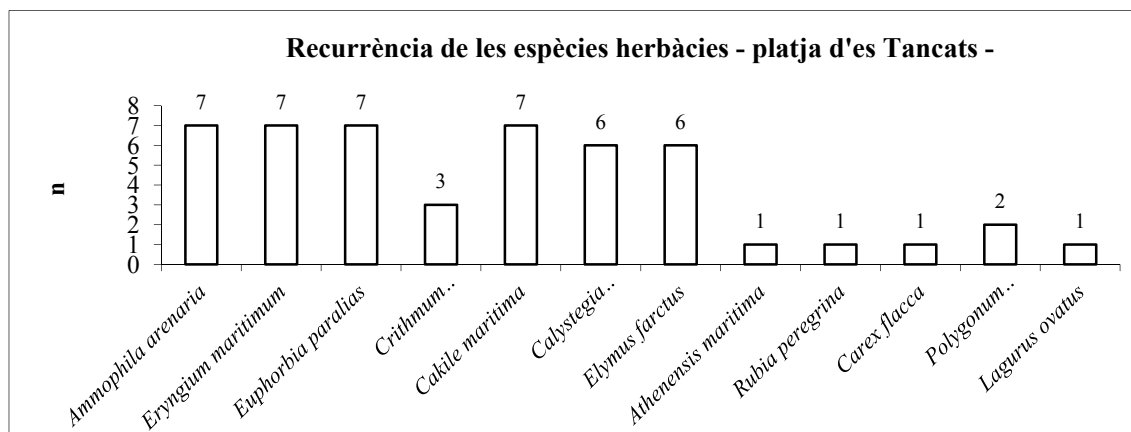
Al sector analitzat del sistema de La Vall es fa clara una diferenciació entre vegetació herbàcia i arbustiva/lleuyosa. Aquest és el cas a on majors diferències existeixen vers al pes que representada cada tipologia. Les característiques geomorfològiques intrínseques, caracteritzades per una extensa zona de dunes mòbils fixades principalment per vegetació herbàcia, fa que aquesta tenguin un pes notablement major a la de característiques arbustives. Sigui com sigui un total de 12 espècies amb característiques herbàcies han estat mostrejades al llarg de les 7 morfologies (Taula 44). No obstant el pes mostrat és força divergent entre elles.

<b>Espècies herbàcies</b>	<b>Total</b>	<b>%</b>
<i>Ammophila arenaria</i>	7	100,00
<i>Eryngium maritimum</i>	7	100,00
<i>Euphorbia paralias</i>	7	100,00
<i>Crithmum maritimum</i>	3	42,86
<i>Cakile maritima</i>	7	100,00
<i>Calystegia soldanella</i>	6	85,71
<i>Elymus farctus</i>	6	85,71
<i>Athenensis maritima</i>	1	14,29
<i>Rubia peregrina</i>	1	14,29
<i>Carex flacca</i>	1	14,29
<i>Polygonum maritimum</i>	2	28,57
<i>Lagurus ovatus</i>	1	14,29

**Taula 44:** Espècies herbàcies identificades al llarg dels 7 *blowouts* analitzats a la platja des Tancats, La Vall. Es mostra la seva recurrència en termes absoluts i percentuals sobre el total de la mostra.

Destaquem per a sobre d'altres espècies com *Ammophila arenaria*, *Eryngium maritimum*, *Euphorbia paralias* o *Cakile maritima*, les quals han estat identificades en la totalitat dels *blowouts*, representant així una recurrència del 100 %. Com a apunt descriptiu, basat en observacions al camp – també visualitzat a la Figura 132 – i amb la

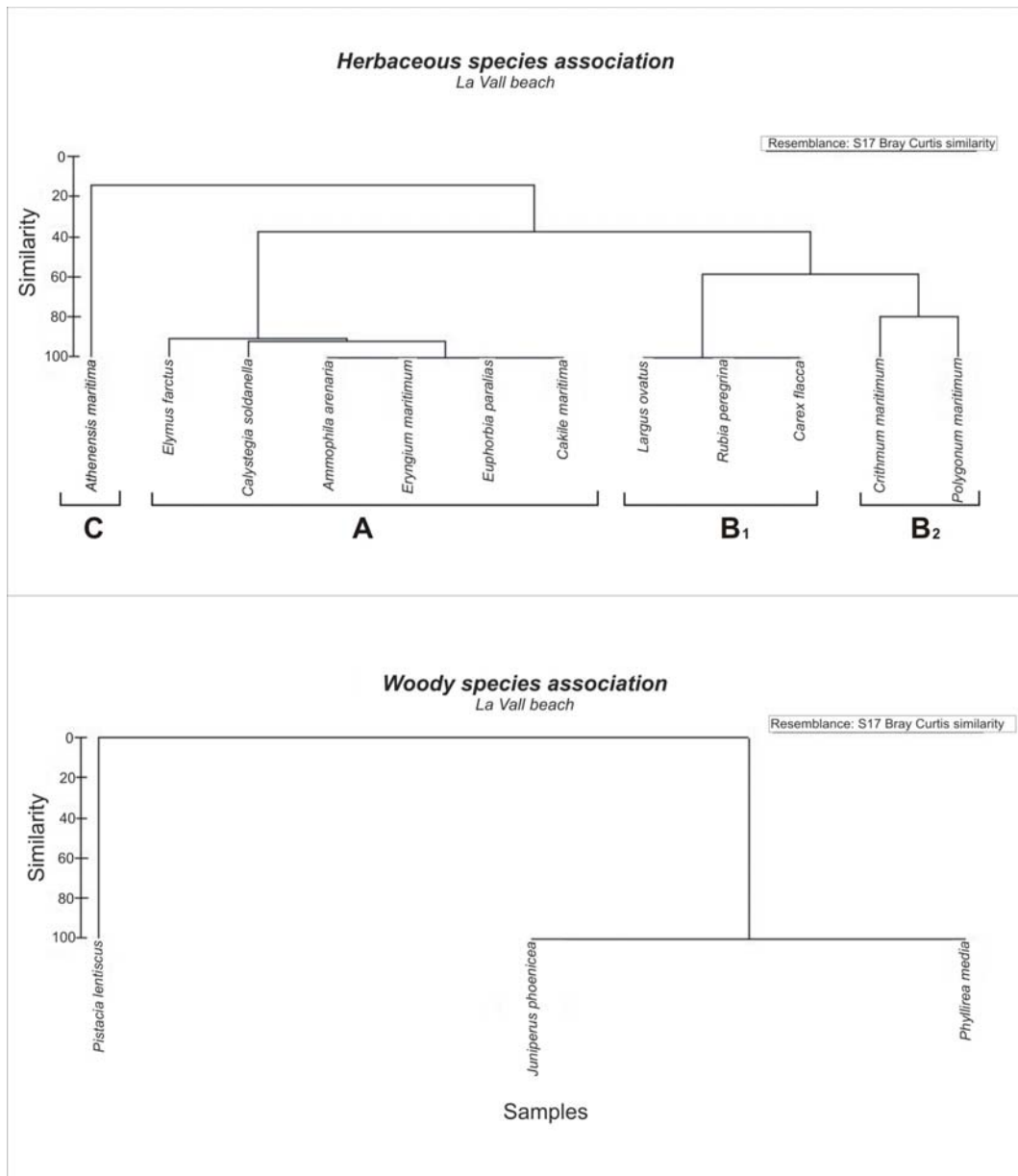
descripció que dóna Servera (1997) sobre el mateix sistema, el sector de dunes mòbils o semi-estabilitzades està colonitzat principalment per *Ammophila arenaria*. Seguint amb la jerarquia de les herbàcies, destacar el pes d'altres espècies com *Calystegia soldanella* o *Elymus farctus*, presents en 6 dels 7 *blowouts* analitzats, i amb una recurrència del 85.71 %. No obstant, la resta de les espècies disminueix el seu pes notablement, sent identificades entre 1 i 3 morfologies, i amb pesos que van del 14.29 % al 42.86 %. Aquestes són *Crithmum maritimum* (n= 3), *Polygonum maritimum* (n= 2), i *Athenensis maritima*, *Rubia peregrina*, *Carex flacca* i *Lagurus ovatus* (n= 1). Aquestes diferències queden nítidament reflectides a la Figura 140 la qual representa la recurrència de cada espècies en termes absoluts.



**Figura 140:** Recurrència, en termes absoluts, de les espècies herbàcies principals al front dunar de la platja d'es Tancats, La Vall.

Les 12 espècies identificades presenten alts patrons de similitud entre elles tenint en compte el seu grau de presència/absència. Aquest es mou principalment entre el 80-100 %, excepte en alguns casos puntuals. Tal i com reflecteix la Figura 141 (superior) es podrien diferenciar entre tres grups. Un primer grup (A) està format per 6 espècies, coincidint amb aquelles que són més recurrents i que entre elles presenten patrons de similitud del 100%, o molt pròxims. Són *Cakile maritima*, *Euphorbia paralias*, *Eryngium maritimum*, *Ammophila arenaria*, *Calystegia soldanella* i *Elymus farctus*, totes elles amb presència a 6-7 *blowouts* (Taula 44). Pel segon grup (B) en caldria fer una subdivisió. Així el B<sub>1</sub> queda compost per 3 espècies (*Largus ovatus*, *Rubia peregrina* i *Carex flacca*) que en termes absoluts tenen poc pes sobre la mostra, però que entre elles tenen un alt nivell de similitud, del 100 % o pròxim. Dit d'una altra manera, espècies que han estat identificades a pocs *blowouts* però que en canvi sempre han coincidit entre sí. El B<sub>2</sub>, format per *Crithmum maritimum* i *Polygonum maritimum*,

es caracteritza a l'igual per espècies amb poc pes absolut sobre la mostra, en aquest cas relacionades entre sí en un 80%. D'aquesta manera el segon grup (B) s'estableix a partir d'espècies poc recurrents però que presenten patrons de presència força similars entre sí. Finalment el tercer grup (C) es presenta com a residual, format sols per *Athenensis maritima*, la qual amb un pes molt baix de presència, presenta molt poca similitud – és a dir, poca coincidència – en cap altra espècie.



**Figura 141:** Agrupacions de les espècies vegetals identificades i mostrejades al front dunar La Vall a partir de la seva presència/absència en cada una de les morfologies. Els anàlisis *cluster* o dendrograms han estat realitzats a partir de l'índex *Bray Curtis similarity*. A la part superior (A) es mostren les agrupacions derivades de les espècies herbàcies existents, mentre que a la part inferior de la imatge (B) es fa el propi amb el cas de les espècies llenyoses o arbustives

Tal i com es reflectia al cas de Cala Tirant ( veure epígraf 3.2.1.2.5.) la situació de les espècies arbustives es contempla quasi com a insignificant si la comparem amb la tipologia anterior. En el cas de La Vall només s'identifiquen 3 espècies llenyoses al llarg dels 7 *blowouts* mostrejats. No obstant, més que l'escàs nombre d'espècies identificades, el més menyspreable en aquest cas és el poc pes que tenen cada una d'elles, només presents en un dels punts analitzats (Taula 45).

<b>Espècies arbustives</b>	Total	%
<i>Juniperus phoenicea</i>	1	14,28
<i>Phillyrea media</i>	1	14,28
<i>Pistacia lentiscus</i>	1	14,28

**Taula 45:** Espècies arbustives identificades al llarg dels 7 *blowouts* analitzats a La Vall. Es mostra la seva recurrència en termes absoluts i percentuals sobre el total de la mostra.

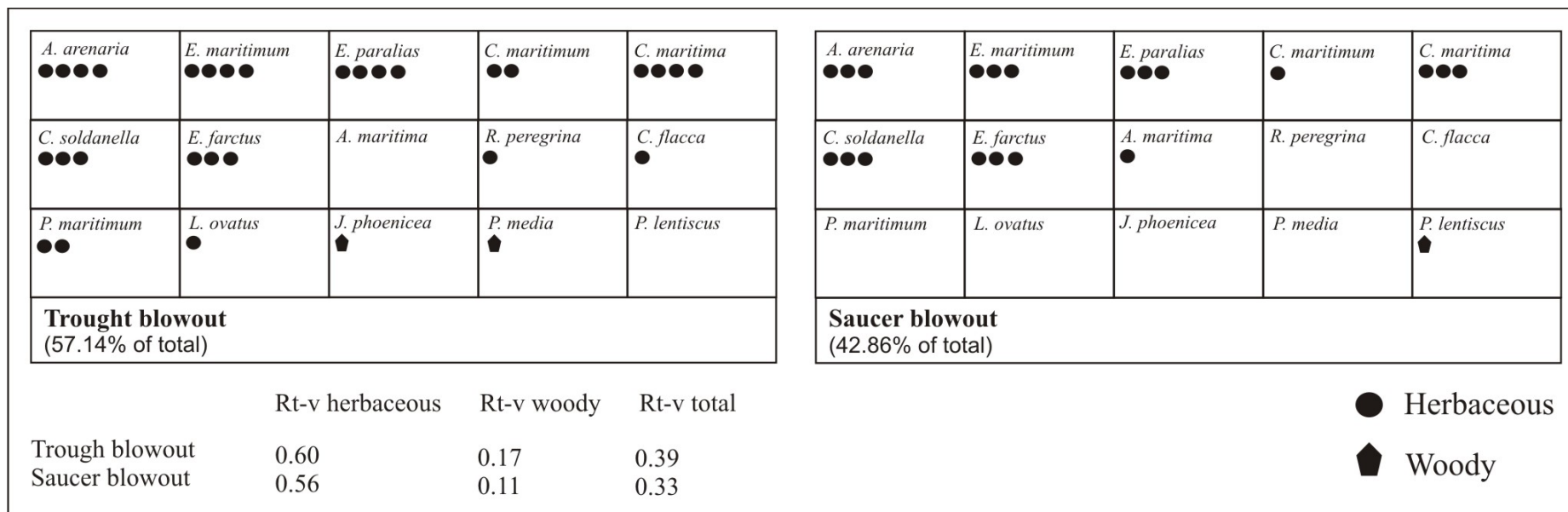
Arrel de la poca importància mostrada es fa gairebé innecessari comentar els patrons de similitud – coincidència – entre elles, mostrats per la Figura 14 (inferior). En el cas de *Juniperus phoenicea* i *Phillyrea media* coincideixen en l'únic *blowout* en els que ambdues han estat identificades, no obstant *Pistacia lentiscus* no mostra cap coincidència amb cap de les dues.

#### 3.2.2.2.6. Patrons de relació botànica-geomorfològica

Les diferències entre els dos tipus de vegetació – herbàcia i llenyosa – i les dues tipologies de *blowouts* existents a la platja d'es Tancats no són tant notables com en els altres sistemes estudiats. Aquest fet és deu a que els pes percentual entre ambdues tipologies no és tampoc tant distant (Figura 138).

A l'igual però, l'aplicació de l'índex  $R_{t-v}$  ens permet ponderar aquesta relació d'acord amb el pes percentual de les tipologies identificades, fixat en el 57.14 % en el cas dels *trough blowouts*, i en el 42.86 % pel que respecte als *saucer blowouts*. Si ens centrem en els valors mitjans es mostra l'evidència de que la relació és més forta entre ambdues tipologies i les espècies herbàcies. En tant als *trough blowouts* aquestes mantenen una relació de  $R_{t-v} = 0.6$ , mentre que en el cas de les llenyoses es limita a  $R_{t-v} = 0.17$ . Pel que fa als *saucer blowouts*, es relacionen amb les herbàcies amb  $R_{t-v} = 0.56$ , mentre que amb les llenyoses sols amb  $R_{t-v} = 0.11$  (Taula 46).





**Figura 142:** Representació gràfica del pes que cada una de les espècies – en termes absoluts – presenten en les diferents tipologies existents al llarg del front de la platja des Tancats (La Vall). En aquest cas el número de punts associats a cada espècie representa la seva presència vers a cada una de les tipologies.

$R_{t-v}$	Trough blowout	Saucer blowout
	57,14%	42,86%
<i>Ammophila arenaria</i>	1	1
<i>Eryngium maritimum</i>	1	1
<i>Euphorbia paralias</i>	1	1
<i>Crithmum maritimum</i>	0,5	0,33
<i>Cakile maritima</i>	1	1
<i>Calystegia soldanella</i>	0,75	1
<i>Elymus farctus</i>	0,75	1
<i>Athenensis maritima</i>	0	0,33
<i>Rubia peregrina</i>	0,25	0
<i>Carex flacca</i>	0,25	0
<i>Polygonum maritimum</i>	0,5	0
<i>Lagurus ovatus</i>	0,25	0
<b>Espècies herbàcies</b>	<b>0,60</b>	<b>0,56</b>
<i>Juniperus phoenicea</i>	0,25	0
<i>Phillyrea media</i>	0,25	0
<i>Pistacia lentiscus</i>	0	0,33
<b>Espècies llenyoses</b>	<b>0,17</b>	<b>0,11</b>

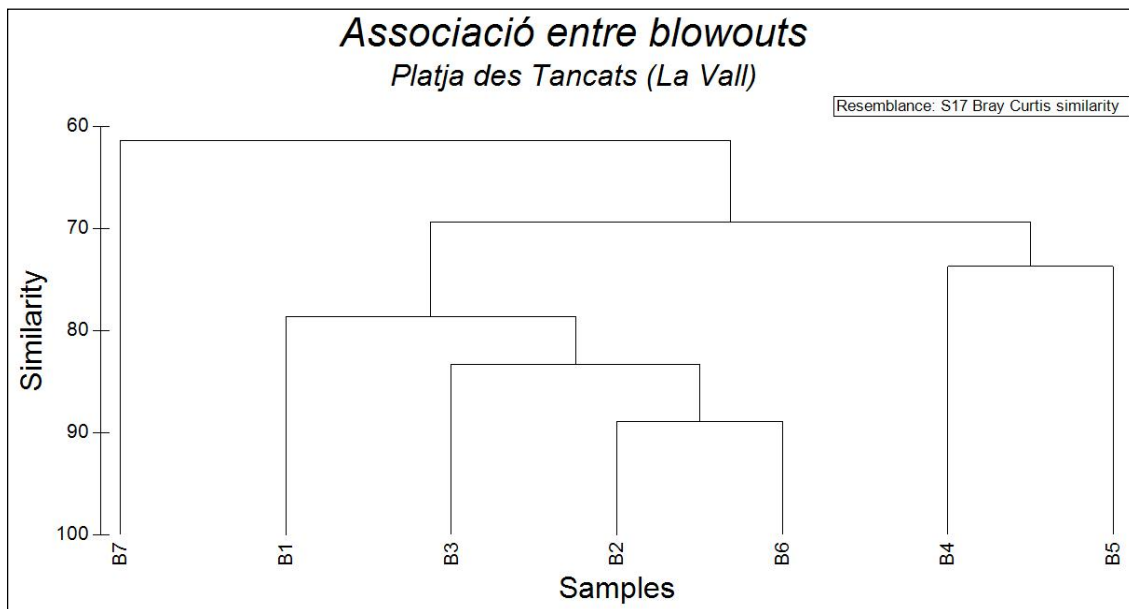
**Taula 46:** Valors derivats de l'aplicació de l'índex 0-1  $R_{t-v}$  per a tal de determinar els patrons de relació reals entre les espècies vegetals identificades i les tipologies de *blowout* al sistema de La Vall.

Analitzant la relació per espècies, normalment aquelles més recurrents – principalment en el cas de les herbàcies – són les que major relació tenen amb ambdues tipologies de *blowouts*. Es pot observar com espècies tals com *Ammophila arenaria*, *Eryngium maritimum*, *Euphorbia paralias* o *Cakile maritima* es relacionen amb  $R_{t-v}=1$  tant amb les morfologies *trough* com *saucer*. Al contrari, les espècies no tan recurrents són les que mostren valors menors, siguin per exemple *Rubia peregrina*, *Carex flacca* o *Lagurus ovatus*, entre altres, amb valors que de  $0 < R_{t-v} > 0.25$  (Taula 46).

Pel que fa al cas de les espècies llenyoses l'anàlisi esdevé de nou gairebé insignificant ja que la relació que aquestes mantenen de forma individual amb cada una de les tipologies és molt baixa,  $0 < R_{t-v} > 0.33$ . *Juniperus phoenicea* i *Phillyrea media* es relacionen sols, i de forma lleugera, amb els *trough blowouts*, amb  $R_{t-v}=0.25$  els dos casos, mentre que *Pistacia lentiscus* només té relació amb els *saucer blowouts*, en aquest cas amb  $R_{t-v}=0.33$ .

### 3.2.2.2.7. Caracterització i agrupació integrada del *blowouts*

Després d'analitzar conjuntament la similitud entre els 7 *blowouts* estudiats al sistema dunar de La Vall, considerant alhora les variables taxonòmiques, geomorfològiques i d'ús i gestió, s'observa que el grau de similitud mitjà es mou entre el 70-90 % (Figura 143). Destacar el grau de similitud mostrat entre els BOL2 i BOL6, exactament fixat en el 88.9 %. D'altra banda, en valors pròxims es troben el BOL3 i el BOL1, completant el grup que contempla major grau de similitud. Els BOL4 i 5 es troben pròxims entre sí, amb un patró de similitud del 73,6 %, i relacionat amb el primer grup en un 70%. Finalment, el BOL7, caracteritzat per la seva major complexitat taxonòmica i geomorfològica és el que presenta menor grau de similitud amb la resta de la mostra, en aquest cas amb valors lleugerament superiors al 60%.



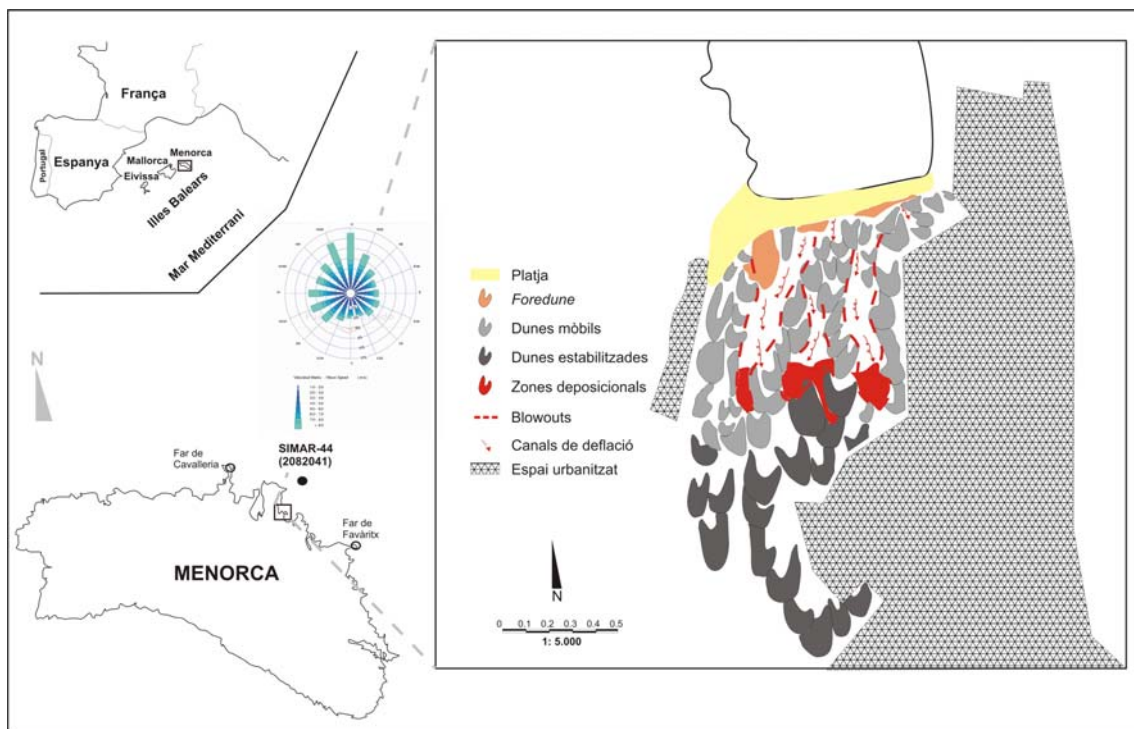
**Figura 143:** Anàlisi cluster dels 7 *blowouts* analitzats a la platja d'es Tancats (La Vall) a partir de la consideració de les seves característiques geomorfològiques, taxonòmiques i estat de gestió.

### 3.2.3. Sistema dunar de s'Olla

#### *3.2.3.1. Localització i caracterització geogràfica del sistema*

El sistema dunar de s'Olla es localitza a la costa septentrional de l'illa de Menorca (Figura 144). En l'actualitat el sistema es troba notablement alterat a conseqüència dels processos urbanitzadors donats al llarg de les darreres dècades, tot i que encara s'en pot percebre la seva integritat. La superfície que actualment ocupen les morfologies holocèniques i recents, segons Servera (1997), és d'aproximadament 0.24 km<sup>2</sup>. El

sistema en sí es desenvolupa a partir de la platja que es forma dintre de l'entrada existent entre cap Gros, a la part oriental, i el cap de Galta de sa Bova, a la part occidental. En termes generals, es tracta d'un sistema altament actiu, fet que fa pensar amb el seu alt dinamisme energètic, incrementat per la seva obertura als vents de tramuntana. Endemés, la seva disposició respecte a la línia de costa incrementa la canalització del flux eòlic incident, actuant per efecte embut (principi de Bernoulli) sobre el desenvolupament del sistema dunar consolidat terra endins.



**Figura 144:** Localització geogràfica del sistema de s'Olla, i representació esquemàtica de les característiques geològiques i geomorfològiques del sistema i voltants.

Seguint els passos de Cala Mesquida, a Mallorca (epígraf 3.1.3.), les característiques físiques i dinàmiques del sistema platja-duna de s'Olla fan que la seva caracterització en la present tesi sigui acotada de forma diferent a la que s'ha seguit en els altres sistemes. El perceptible dinamisme en el seu comportament i evolució duu associat la importància de conèixer i delimitar quins han estat els patrons evolutius a llarg termini. Des d'una perspectiva general, el sistema dunar de s'Olla, i a diferència dels patrons evolutius de la majoria dels sistemes balears, manté una direccionalitat perpendicular a la línia de costa, i no en forma de cordons paral·lels a la mateixa (Figura 145). Aquesta tendència es manifesta principalment a partir del desenvolupament terra endins de dos grans lòbuls de deflació o *blowouts*; cada un d'ells localitzats en cada un

dels extrems. L'alt dinamisme energètic i sedimentari en primera línia per una banda, i l'estat de degradació sota el qual s'ha vist el cordó de *foredunes* al llarg dels anys per l'altra, són els dos agents que expliquen la poca superfície avui en dia ocupada per dunes mòbils o semi-estabilitzades – per vegetació –.



**Figura 145:** Vista obliqua del sistema dunar de s'Olla – orientada cap al sur –. Foto: F.X. Roig-Munar

Servera (1997) indica que el sistema es desenvolupa terra endins a partir d'una platja d'uns 300 m de llargària, amb una amplada que oscil·la entre els 25-175 m, i amb una superfície aproximada als 18.758 m<sup>2</sup>. El dinamisme físic associat al sistema fa que les dimensions i cobertures de cada unitat pugui variar substancialment amb el temps. No obstant, i seguint al mateix autor, les *foredunes*, després de sofrir gairebé una integral desaparició, tenen una cobertura entorn als 925 m<sup>2</sup>, alternada amb la presència de morfologies embrionàries tals com *shadow dunes* o *echo dunes*, que s'estendrien al llarg d'uns 3.563 m<sup>2</sup>.

En el seu cas les dunes mòbils ocuparien una superfície aproximada a les 9.5 ha, estenent-se terra endins fins a uns 450 m de la línia de costa. Finalment, el sector de dunes estabilitzades, segons Servera (1997), és el que més ha patit les conseqüències dels diferents processos urbanitzadors. L'àrea a on encara aquestes morfologies estabilitzades es poden reconèixer ocupa una superfície aproximada a les 13 ha.

### 3.2.3.2. Evolució espai-temps del sistema dunar de s'Olla

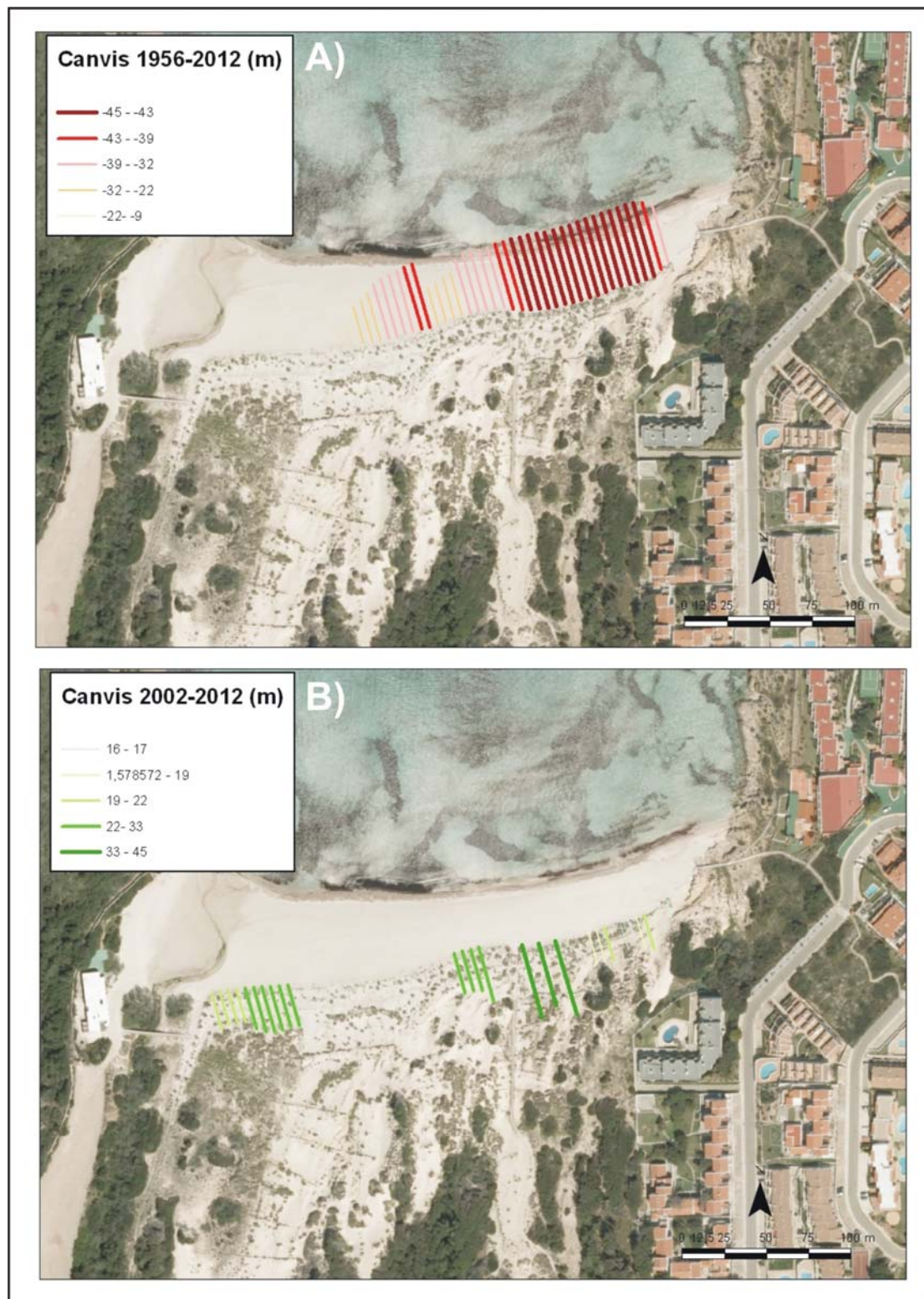
#### 3.2.3.2.1. Evolució del front dunar (1956-2012)

Si es quantifica l'evolució i el comportament del front de dunes de s'Olla des de 1956 fins a l'actualitat es veu com aquest ha estat controlat pels processos erosius existents, traduïts al llarg del temps amb un retrocés generalitzat de la primera línia de duna, tot i que amb algunes puntualitzacions, al transcórrer dels darrers anys.

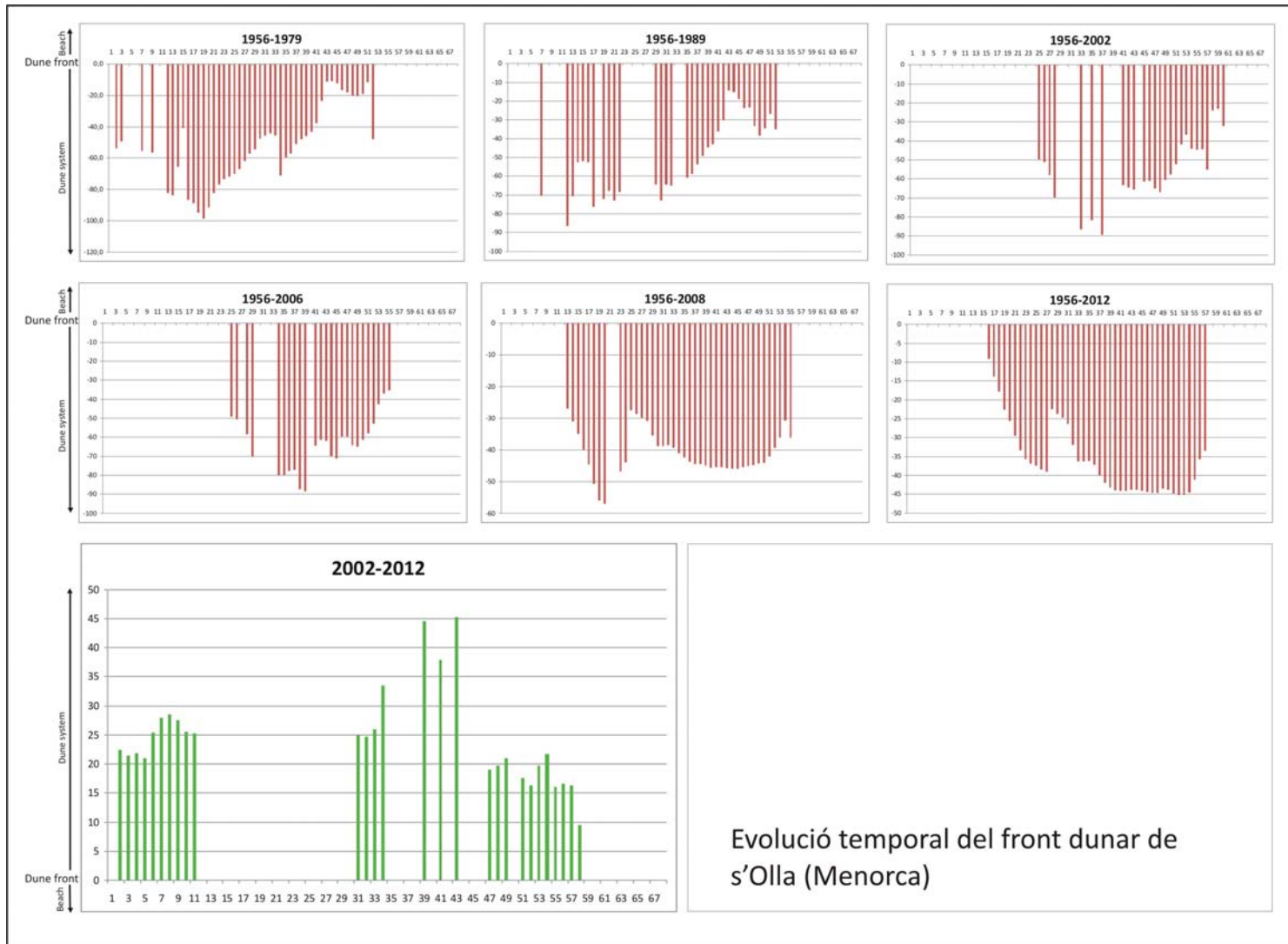
	1956-1979	1956-1989	1956-2002	1956-2006	1956-2008	1956-2012
<b>Retrocés</b>						
<b>absolut (m)</b>	-47,97	-35,09	-32,24	-35,20	-36,14	-33,48
<b>EPR (m/any)</b>	-2,10	-1,09	-0,70	-0,70	-0,69	-0,60

**Taula 47:** Patrons de retrocés acumulat en el front dunar de s'Olla entre el període 1956-2012 – les dades sempre prenen com a referència la situació de 1956 –.

En termes generals el front de dunes de s'Olla, al llarg del període 1956-2012, ha sofert un retrocés mitjà de 33.48 m, amb una taxa de -0.6 m/any (Taula 47). Des del punt de vista espacial el comportament erosiu del sistema en qüestió ha estat gairebé generalitzat. Els patrons evolutius de la primera línia de duna s'han vist afectats per l'erosió, arribant a retrocessos de fins a -43 m (acumulats entre 1956-2012) (Figura 147A). No obstant aquesta tendència queda manifesta sobretot al sector oriental de la platja, i amb un punt d'inflexió marcat al 2002 (Figura 147B). La diferència entre la situació mostrada pel sector oriental i occidental a la Figura 147 respón principalment a la situació de 1956. En aquell moment no existia línia de *foredune* al sector occidental, esdevenint aquesta la part més dinàmica del sistema, controlada per processos de deflació sedimentària des de la platja alta cap a l'interior. No obstant, sí existia front dunar a la part oriental, suposant que els processos erosius només quedin reflectits al sector est. A partir de 2002 es començaren a aplicar mesures de gestió enfocades a la recuperació geomorfològica de la primera línia, revertint positivament al llarg de tota la platja (Figura 147B). Aquest fet suposà una certa recuperació del sector oriental, que fins al moment havia estat controlat per un important retrocés, arribant a màxims de creixement de 45 m (2002-2012). D'altra banda, ajudaren a la formació i desenvolupament d'una primera línia de duna al sector occidental, inexistent fins al moment, i amb màxims de creixement i desenvolupament de fins a 33 m.



**Figura 147:** Comportament espacial del front dunar de s'Olla (Menorca) en els períodes 1956-2012, 2002-2012. La cartografia base respón a la foto aèria de 2012.



**Figura 148:** Anàlisi sobre els processos de retrocés i creixement en el front dunar de s'Olla per períodes, sempre partint de la situació inicial de 1956.



	1956-1979	1979-1989	1989-2002	2002-2006	2006-2008	2008-2012
<b>Retrocés</b>						
<b>absolut (m)</b>	-47,97	-12,88	-19,36	0,02	0,94	0,96
<b>EPR (m/any)</b>	-2,10	-0,9	-1,2	0	0,01	0,02

**Taula 48:** Patrons de retrocés acumulat i taxa de retrocés en el front dunar de s'Olla per períodes.

Temporalment, si bé la tendència general ha estat marcada pel retrocés del front dunar, aquesta s'ha donat amb diferents intensitats. Endemés, cap apuntar algunes apreciacions sorgides a partir del 2002, punt d'inflexió vers a l'estat de conservació de la primera línia de s'Olla. En termes acumulatius, des de la situació inicial de 1956, i tal i com reflecteix el panell superior de la Figura 148, la tendència va ser notablement negativa en tant a la situació de la primera línia de duna i del seu estat de conservació, amb una tendència de retrocés manifesta en cada un dels períodes analitzats. No obstant, si l'anàlisi es limita al període entre 2002-2012 (panell inferior de la Figura 148) es pot observar com hi ha un canvi de tendència notablement considerable, inclús manifestat per l'acreció sedimentària i recuperació de la *foredune*. Aquest canvi de tendència queda palès quantitativament a la Taula 48, a on es postula com un moment d'inflexió el qual canvia la tendència de retrocés soferta pel sistema fins al moment. De fet, si s'analitza el basculament del front de dunes per períodes es veu com en el primer, 1956-1979, s'experimenta el màxim retrocés, amb -47.97 m i una taxa de -2.10 m/any. Si bé els propers, 1979-1989 i 1989-2002, disminueixen lleugerament la tendència inicial, encara experimenten retrocessos que apunten a la degradació del front dunar, amb -35.09 m i -1.09 m/any, i 32.24 m i 0.7 m/any respectivament. Atenent a dites xifres doncs, la tendència entre el període 1956-2002 és notablement negativa vers a l'estat de conservació de la *foredune* a s'Olla, experimentant un retrocés més que considerable.

No obstant, i com s'esmentava anteriorment, la situació sofreix una certa millora a partir d'aquest moment. Si bé és cert que el còmput final queda marcat per una tendència erosiva del sistema (panell superior Figura 148), a partir de 2002 la tendència canvia, inclús donant signes de recuperació i accreció sedimentària en alguns sectors de la platja. Dita recuperació es mostra també a la Taula 48, a on es pot apreciar com entre 2002 i 2012 la tendència general passa a ser – tot i que de manera molt tímida – positiva. El període 2002-2006 és el primer que mostra el canvi, amb un creixement mitjà de 0.02 m. Aquesta tendència es reafirma i consolida als períodes posteriors, concretament entre 2006-2008 amb un creixement del 0.94 m i una taxa de

0.01 m/any, i entre 2008-2008, amb un creixement de 0.96 m i una taxa de 0.02 m/any.

### 3.2.3.2.2. Variació de la cobertura vegetal – arbòria – (1956-2012)

En el cas de s'Olla, i a diferència del paràmetre utilitzat al cas de Cala Mesquida (Mallorca), es té en consideració l'evolució de la cobertura vegetal arbòria des de 1956 fins a l'actualitat, i no la vegetació herbàcia. El canvi de paràmetre es deu, primer a la baixa qualitat d'algunes fotografies aèries utilitzades en l'anàlisi feta, i en segon lloc, a que el dinamisme sedimentari del sistema en primera línia en molts casos dificultava l'apreciació de la cobertura vegetal herbàcia. Endemés, els límits marcats per la vegetació arbòria en cada any de mostreig es postula també com un paràmetre vàlid per a conèixer l'avanç dels lòbuls de deposició – *blowouts* – terra endins.

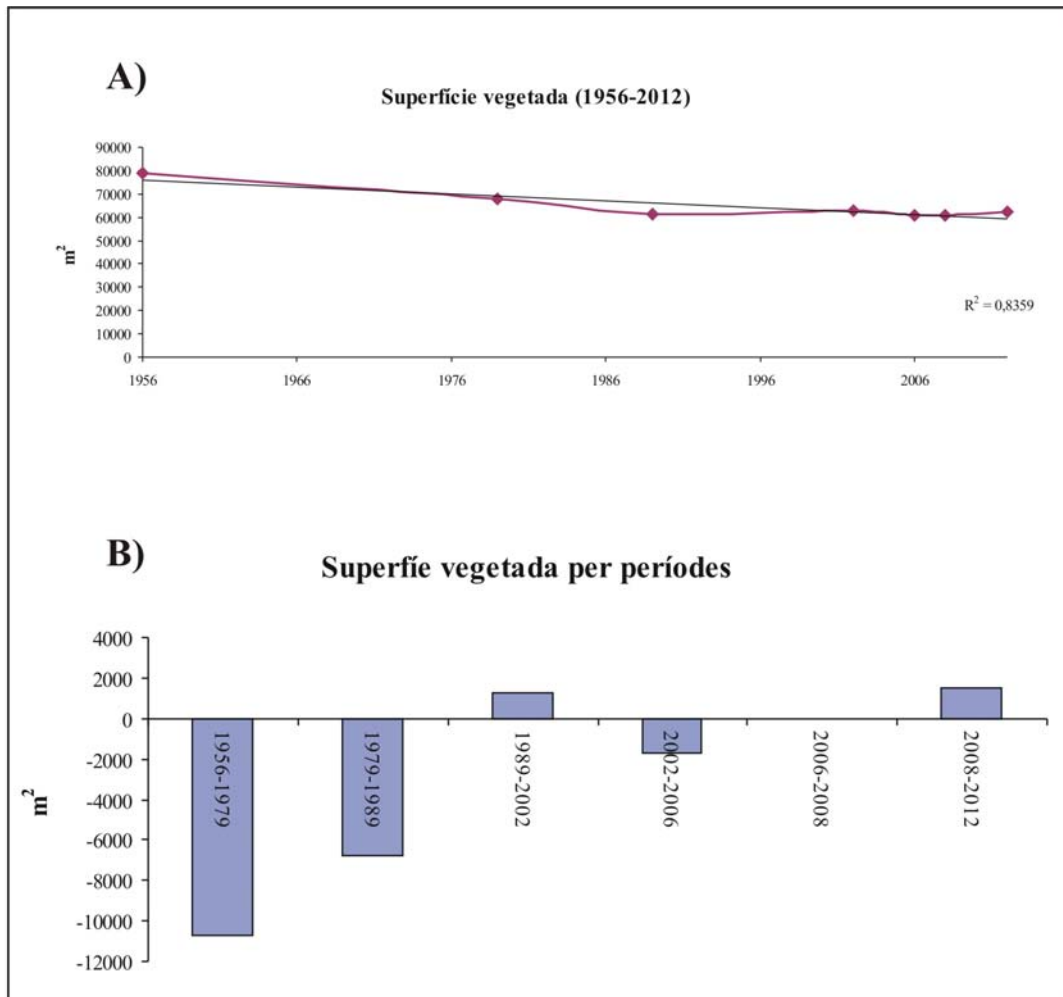
Si s'observa la Taula 49 i la Figura 149A s'aprecia una reducció lleugera i sostinguda en el temps vers a la superfície de la vegetació arbòria en la seva primera línia. En termes absoluts la màxima cobertura arbòria al sistema dunar de s'Olla – al llarg del període estudiat – es troba al 1956 – situació pre-turística – amb un total de 78.774 m<sup>2</sup>, mentre que la mínima és compartida pels anys 2006 i 2008, amb 60.924 m<sup>2</sup> respectivament.

Any	Superfície vegetada (m2)	Període	Superfície vegetada (m2)
1956	78774	1956-1979	-10721
1979	68053	1979-1989	-6757
1989	61296	1989-2002	1302
2002	62598	2002-2006	-1674
2006	60924	2006-2008	0
2008	60924	2008-2012	1476
2012	62400		

**Taula 49:** Evolució de la superfície de vegetació arbòria al sistema de s'Olla. A l'esquerra de la taula es distingeixen les respectives superfícies per a cada un dels anys analitzats, mentre que a la dreta es fa el respectiu pels diferents períodes temporals analitzats.

Sembla però que l'anàlisi més interessant és la que es pugui fer del comportament i la tendència de la cobertura arbòria per períodes (panell dret de la Taula 49 i Figura 149B). Si bé és cert que el còmput general del període total analitzat segueix essent negatiu, es mostren alguns punts de creixement vers a la cobertura vegetal, o si més no almanco, d'estabilització. Clarament hi ha una reducció

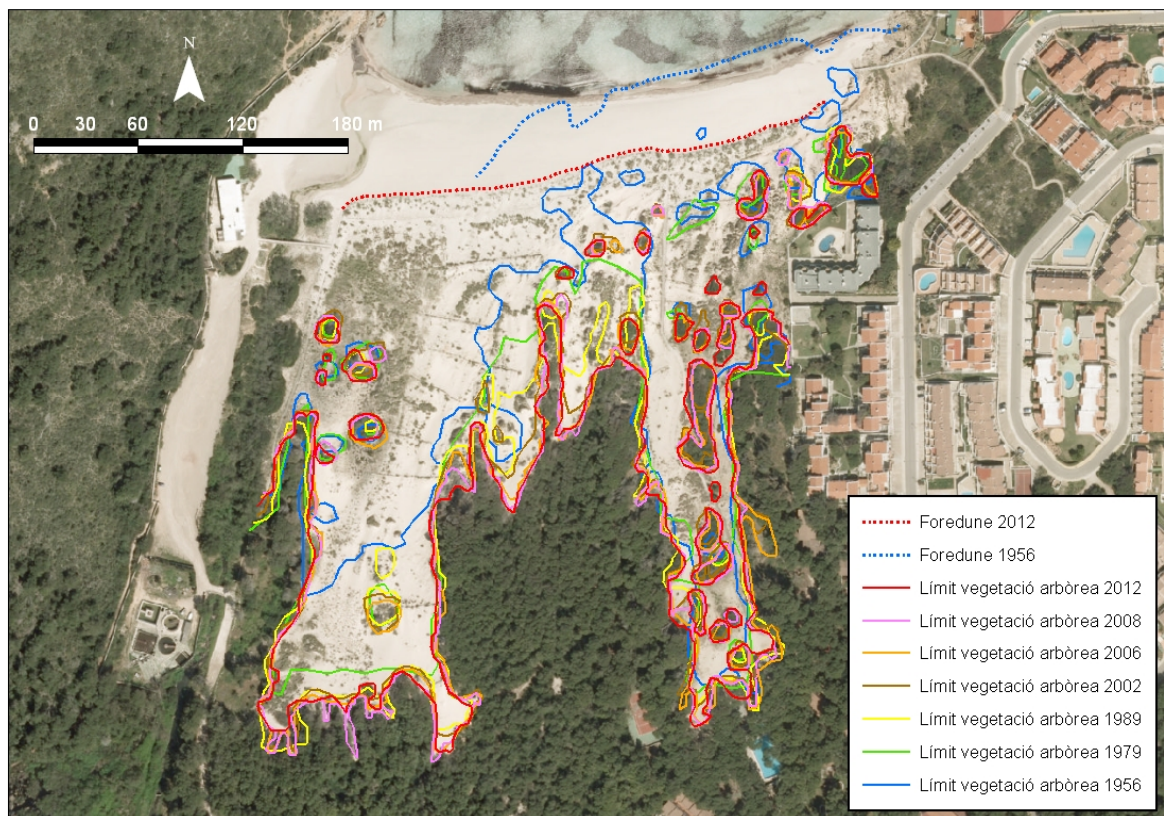
significativa al llarg dels dos primers períodes, entre 1956-1989, amb una pèrdua total – si sumem els dos períodes per separat – de 17.478 m<sup>2</sup>. No obstant la tendència es comença a invertir des de 1989, començant amb un lleuger increment fixat en 1.302 m<sup>2</sup>. Finalment, i si bé és cert que en el període 2002-2006 es torna a experimentar una tímida reducció amb -1.674 m<sup>2</sup>, des de llavors fins a l'actualitat es dona una tendència d'estabilització, acabant amb un creixement de 1.476 m<sup>2</sup> en el període 2008-2012.



**Figura 149:** Evolució espai-temps de la superfície vegetada al sistema de s'Olla. A la part superior (A) es mostra l'evolució considerant cada un dels anys analitzats entre el període 1956-2012, mentre que a la part inferior (B) es fa el propi considerant-la en períodes temporals determinats. Ambdues gràfiques es relacionen amb la Taula 49.

Després de tants anys de tendència negativa, i de decreixement de la superfície arbòria en el sistema de s'Olla, cap fer èmfasi al procés d'estabilització i recuperació donat, sobretot, a partir de 2002. Recordant el que apuntàvem en epígrafs anteriors, les mesures de gestió aplicades vers a la recuperació geomorfològica i ecològica del front dunar han donat una certa estabilització del sistema, suposant per tant una menor

dinàmica eòlica i sedimentària des de la platja alta cap a l'interior del sistema. Aquesta estabilització ha tengut efectes principalment en l'explosió colonitzadora de vegetació herbàcia, sobretot en la *foredune* i el cordó de dunes mòbils. No obstant, també ha facilitat el creixement d'individus aïllats d'espècies arbustives-arbòries que poc a poc van apareixent, també, al sector més mòbil del sistema. Amb aquest escenari destacar dos factors importants; en primer lloc apuntar el notable retrocés de la línia de vegetació arbòria marcada entre 1956 (línia blava) i 1979 (línia verda), mentre que en segon instància apuntar al creixement d'individus aïllats arbori-arbustius a la zona més mòbil del sistema, tal i com apunta la situació marcada al 2012 (línia vermella) (Figura 150).



**Figura 150:** Límits i evolució de la vegetació arbòria al sistema dunar de s'Olla.

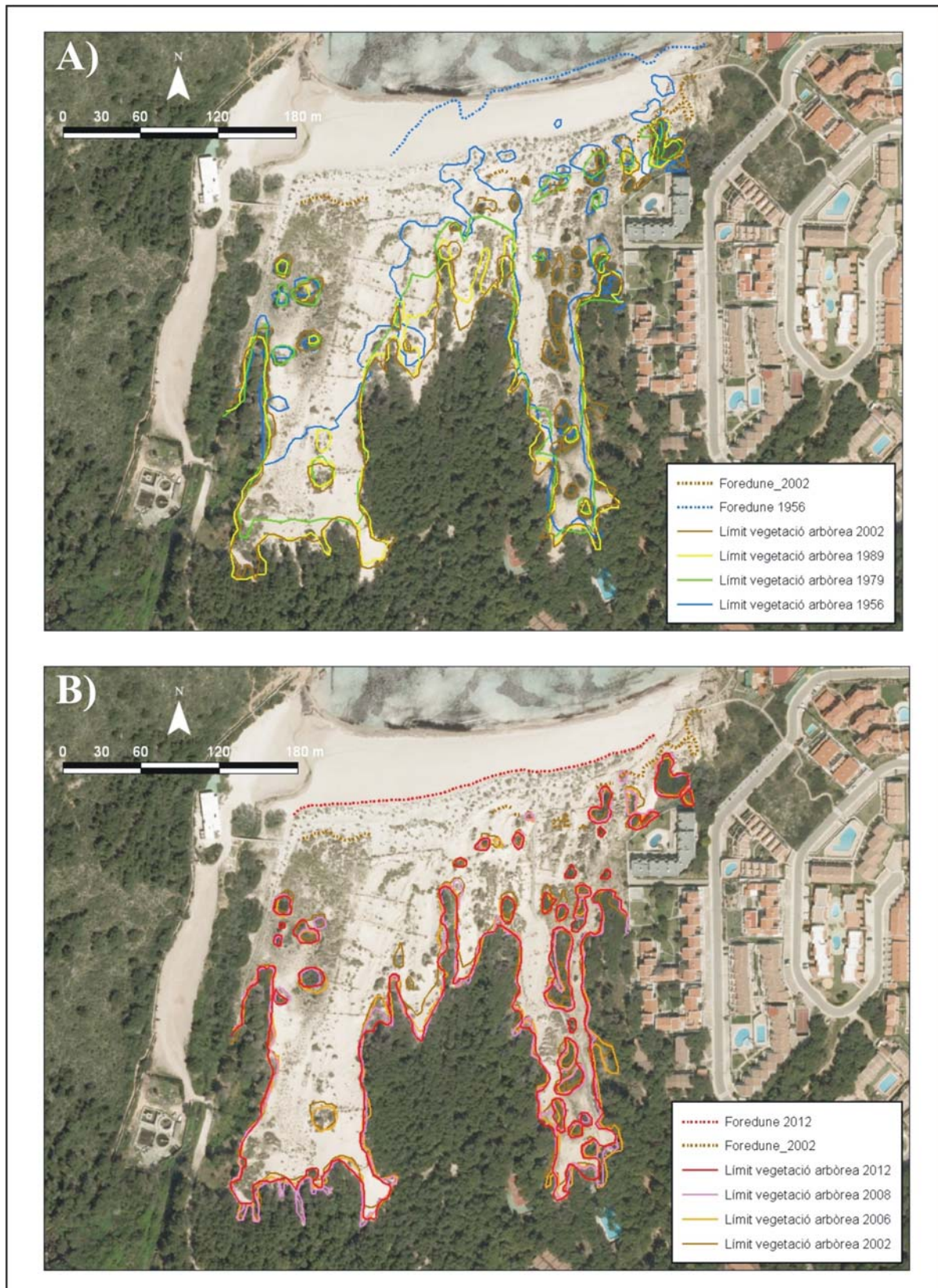
### 3.2.3.2.3. Evolució del lòbuls (blowouts)

Com es comentava amb anterioritat, la disposició i evolució del sistema de s'Olla dibuixa avui un escenari marcat per la presència de dos gran lòbuls sedimentaris que s'endinsen terra endins des de la part superior de la platja emergida. La seva estructura morfològica i el seu funcionament dinàmic, tot i que a una escala

diferent, es podria relacionar amb les morfologies *blowouts*. Els factors que expliquen aquesta disposició, diferenciada de la majoria dels sistemes a Balears, i a l'igual que s'apuntava en el cas de Cala Mesquida (Mallorca) (epígraf 3.1.3.3.3.), semblen passar per l'estat de la conservació del front dunar, i la disminució de la vegetació, en aquest cas, arbòria. Endemés però, i comparant els distints resultats obtinguts, sembla ser que la sinèrgia entre ambdues variables és la que ha determinat l'evolució dels lòbuls des de 1956 fins a 2012.

La manca de resolució en algunes de les fotografies aèries utilitzades han forçat a partir de la línia marcada per la vegetació arbòria a l'hora d'establir l'evolució dels dos lòbuls existents. A la Figura 151 s'aprecien dues situacions a esmentar; en primer lloc destacar el notable avanç sofert pels lòbuls entre 1956 (línia blava) i 1979 (línia verda) (Figura 151A). Aquest avanç s'aprecia sols al lòbul occidental, mentre que l'oriental es manté molt més estable. Si aquesta tendència es relaciona amb el comportament del front dunar (tractat a l'epígraf 3.2.3.2.1.) es pot observar com la zona sense presència de *foredune* en dit període és la que esdevé més activa, i per tant, la que facilita un major avanç del lòbul de cap a l'interior, establint-ne una correlació espacial totalment positiva. Endemés, temporalment també hi ha una forta relació. El període 1956-1979, moment de major avanç del lòbul occidental, coincideix també amb el moment de major retrocés de la *foredune*, fixat amb -47.97 m i una taxa de -2.10 m/any (Taula 48). Aquest binomi es repeteix entre 1979-1989. Si la Figura 151A mostra com hi torna haver una pulsació important vers a l'avanç del lòbul occidental, el retrocés de la *foredune* en aquest cas es fixa en -12.8 m i una taxa de -0.9 m/any.

En segon lloc, i ja centrant l'anàlisi a la Figura 151B, es veu, a l'igual que succeïa amb l'estabilització del front dunar i de la cobertura vegetal arbòria, que a partir de 2002 es produeix una disminució vers a l'avanç dels dos lòbuls, especialment de l'occidental. Aquest escenari no és diferent si es torna comparar amb l'estat de conservació del front dunar. La recuperació de la primera línia de duna iniciada al 2002 a conseqüències de les mesures de gestió aplicades suposà una estabilització progressiva del sistema suposant; en primer lloc una disminució de la dinàmica eòlica i sedimentària a conseqüència d'un increment de rugositat i resistència en primera línia, i en segon lloc facilitant la recuperació i repoblació natural de vegetació principalment herbàcia, però també arbustiva i arbòria.



**Figura 151:** Evolució del lòbuls a s'Olla a partir de la línia marcada per la vegetació arbòria; A) situació evolutiva entre 1956-2002, B) situació evolutiva entre 2002-2012.

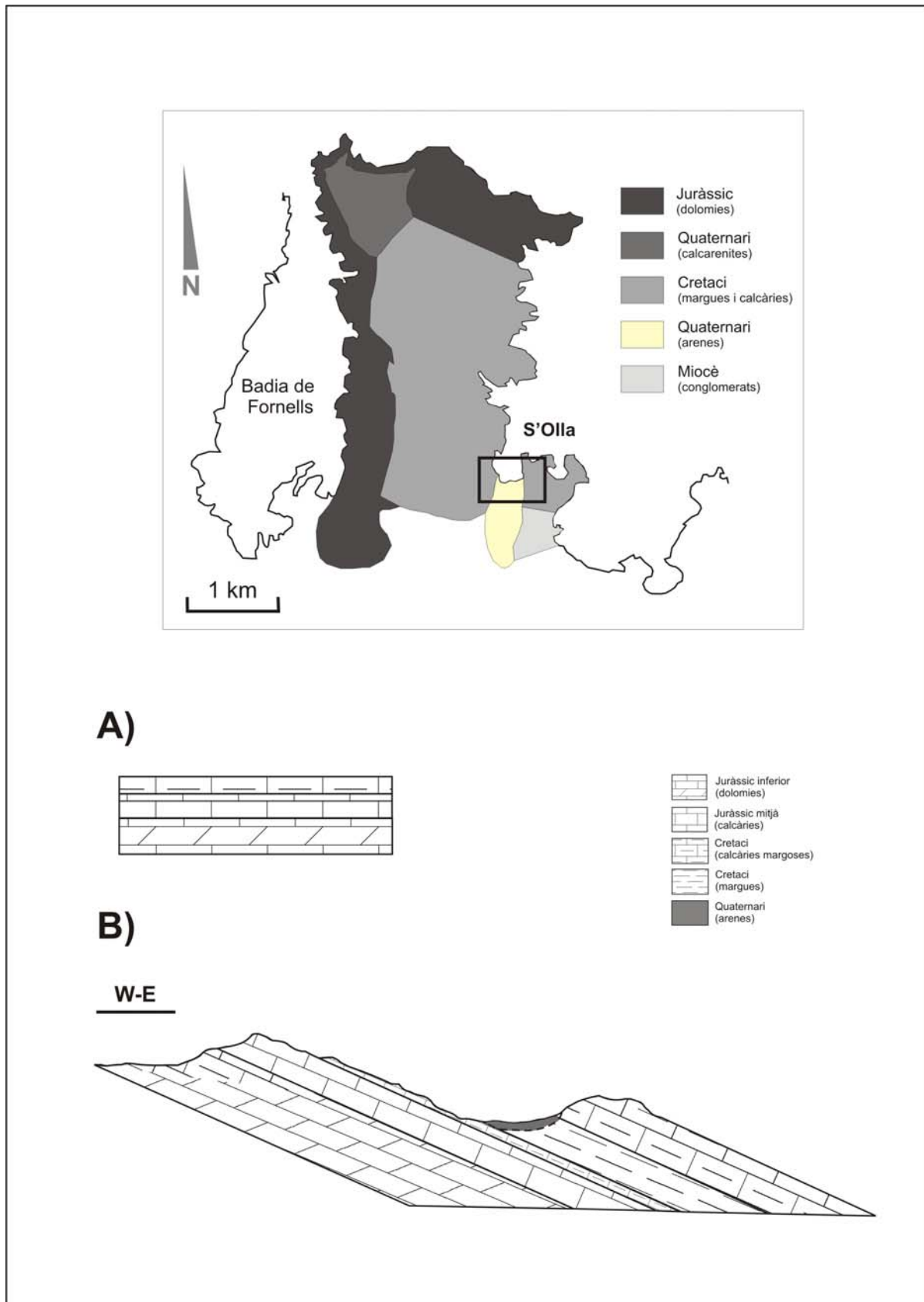
### 3.2.3.3. *Influència del control estructural sobre el desenvolupament del sistema*

El sistema dunar de s'Olla es postula com un exemple vers a la influència que el control estructural del terreny pot tenir en tant al desenvolupament del sistema dunar. Si bé l'anàlisi espai-temps (1956-2012) dut a terme i explicat en els epígrafs anteriors ja ens postula alguns agents claus pel que fa al comportament d'aquest sistema dunar al llarg de les darreres dècades; e.g. estat de conservació del front dunar, grau de cobertura de vegetació arbòria, etc., la projecció del cos de dunes perpendicular a la línia de costa convida a pensar, també, amb la influència que altres agents i factors poden tenir vers al seu comportament. Com ja mencionaven en el cas de Cala Mesquida, i denominador comú de tots els ambients sedimentaris costaners, es dóna per suposat l'existència dels agents físics bàsics per a la formació del sistema de dunes, com són; a) existència de sediment, b) el vent com agent energètic, i c) un espai d'acomodació.

De nou però, el desenvolupament que segueix el camp de dunes en aquest cas, perpendicular a la línia de costa que l'alimenta, es postula notablement diferent al patró que segueixen la majoria dels sistemes de dunes a les Illes Balears. En aquest sentit doncs, les condicions estructurals locals es presenten de nou com l'explicació que pot ajudar a entendre tals circumstàncies.

Des del punt de vista geològic, aquest cas és més senzill que no Cala Mesquida (Mallorca). En aquest sentit es tracta d'una sèrie monoclinial de materials del Juràssic – dolomies – i del Cretaci – margues i calcàries – que cabussen uns 30° cap a l'E (Figura 152). La vall associada a la cala, responent de nou a processos d'erosió diferencial, es situa a sobre dels materials més margosos del Cretaci – més fàcilment erosionables – presentant una direcció N-S que torna a coincidir amb la direcció que presenten les capes. D'aquesta manera, l'espai d'acomodació, a on el material sedimentari és depositat, queda de nou condicionat per les condicions estructurals locals, fet que permet respondre alhora a la direcció i desenvolupament del sistema dunar terra endins, perpendicular a la línia de costa ja mencionada.

La quantitat de sediment per una banda, i l'efecte energètic dels vents principals per l'altra, es tornen a establir com el denominador comú compartit amb la resta dels sistemes insulars. No obstant, com a fet diferencial i a l'igual que ja es comentava en el cas de Cala Mesquida (Mallorca), el control estructural és el que determina la fisonomia de l'espai d'acomodació i per extensió, el particular desenvolupament del sistema de dunes associat.



**Figura 152:** Esquema (sense escala) de la disposició estructural de s'Olla (Menorca). A la part inferior l'esquema A) representa la disposició inicial dels paquets sedimentaris, mentre que B) mostra la topografia actual derivada dels processos de plegament i erosió diferencial.





# Capítol 4

---

**Un experiment és una pregunta que la ciència demana a la natura, i una  
medició és el registre de la resposta de la natura**  
*(Max Planck)*

Dinàmica eòlica i sedimentària



## CAPÍTOL 4 DINÀMICA EÒLICA I SEDIMENTÀRIA

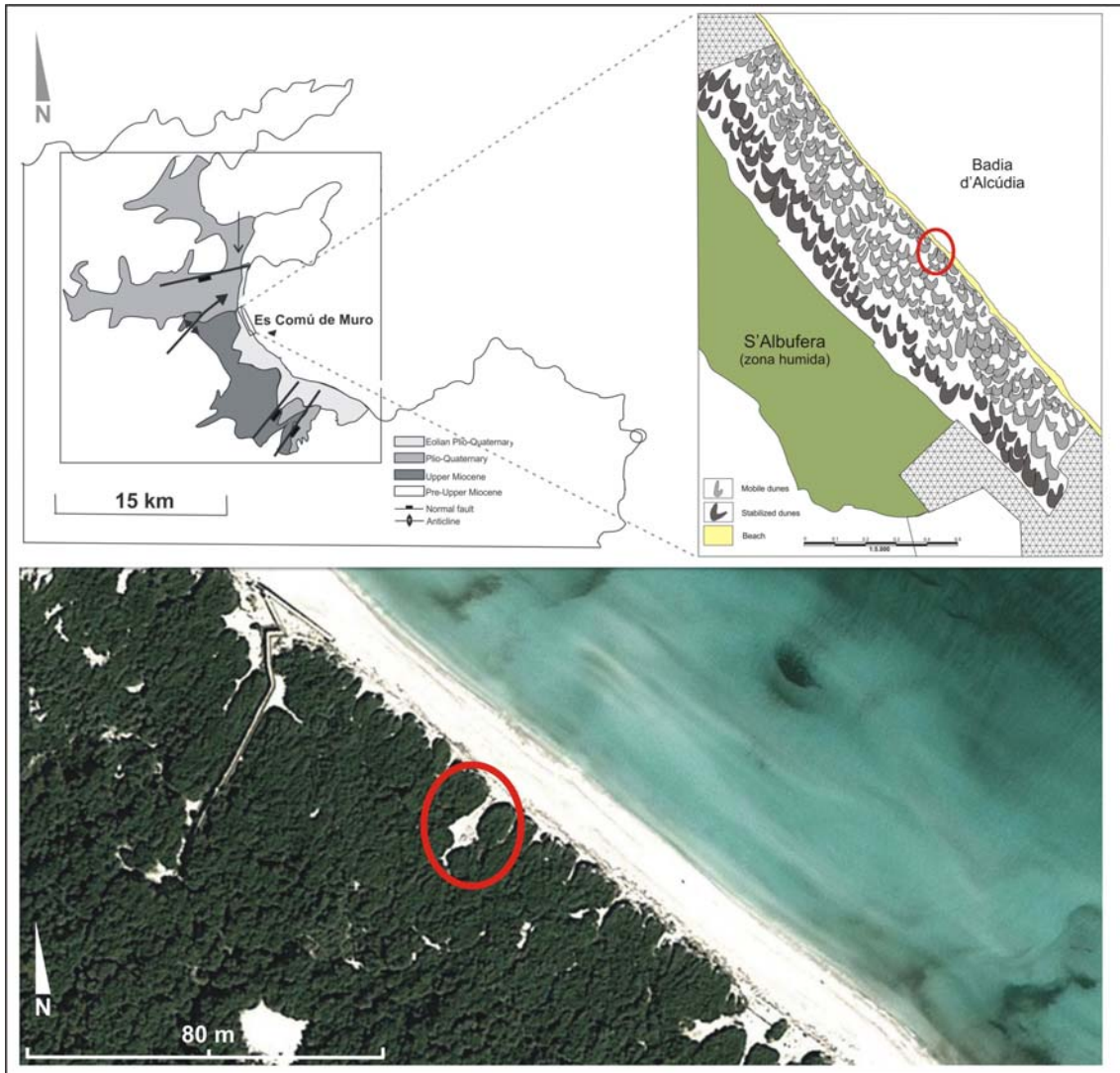
El present capítol té per objectiu mostrar els resultats obtinguts de les campanyes de camp destinades a incrementar el coneixement sobre la dinàmica eòlica i sedimentària dintre de morfologies *blowout* en sistemes dunars costaners. Per a tal fi es presenten les dades obtingudes de tres campanyes de camp realitzades, per una banda a un *blowout* existent al front dunar d'es Comú de Muro, Mallorca (apartat 4.1.), i d'altra en una morfologia present al sistema de Cala Tirant, Menorca (apartat 4.2.). Posat que un dels objectius passava per a veure les diferències de comportament (tant eòlic com sedimentari) existents sota distintes condicions energètiques, en el cas de Cala Tirant s'han dut a terme dos experiments, un sota condicions energètiques de calma i l'altre sota la influència de vents amb velocitats mitjanes-altes. Així doncs, es separen els resultats obtinguts en cada cas per a la seva final comparació.

### 4.1. Estudi de cas: es Comú de Muro (Mallorca)

#### 4.1.1. Localització i caracterització física del *blowout*

La morfologia analitzada es situa al front de dunes del sistema d'es Comú de Muro, localitzat al quadrant nord oriental de l'illa de Mallorca (descripció del sistema a l'epígraf 3.1.1.). Tal i com era objecte amb l'estudi de la present tesi, el *blowout* es troba inserit dins la primera línia de duna. En aquest cas però, l'alteració geomorfològica del sistema en qüestió no ens permet parlar d'una zona dinàmica des del punt de vista sedimentari, sinó que totalment condicionada per la fixació de la vegetació, en aquest cas principalment llenyosa i arbustiva.

Des d'una perspectiva espacial més reduïda el *blowout* es localitza, podem dir, a la part central de la platja d'es Comú de Muro, de poc més de 1.5 km de longitud (Figura 153). Tot i ser la zona més llunyana als dos pols turístics limítrofes, els nuclis de platges de Muro al nord i Can Picafort al sud, es troba proper a la principal entrada – única avui dia – a la platja des de l'interior del sistema. Cal dir, a nivell d'apunt, que en aquest cas els *blowouts* existents en primera línia al llarg de dècades també han estat utilitzats com a vies d'accés a la platja des de l'interior del sistema consolidat. Sembla ser que el nostre cas d'estudi no és excepció en aquest sentit.

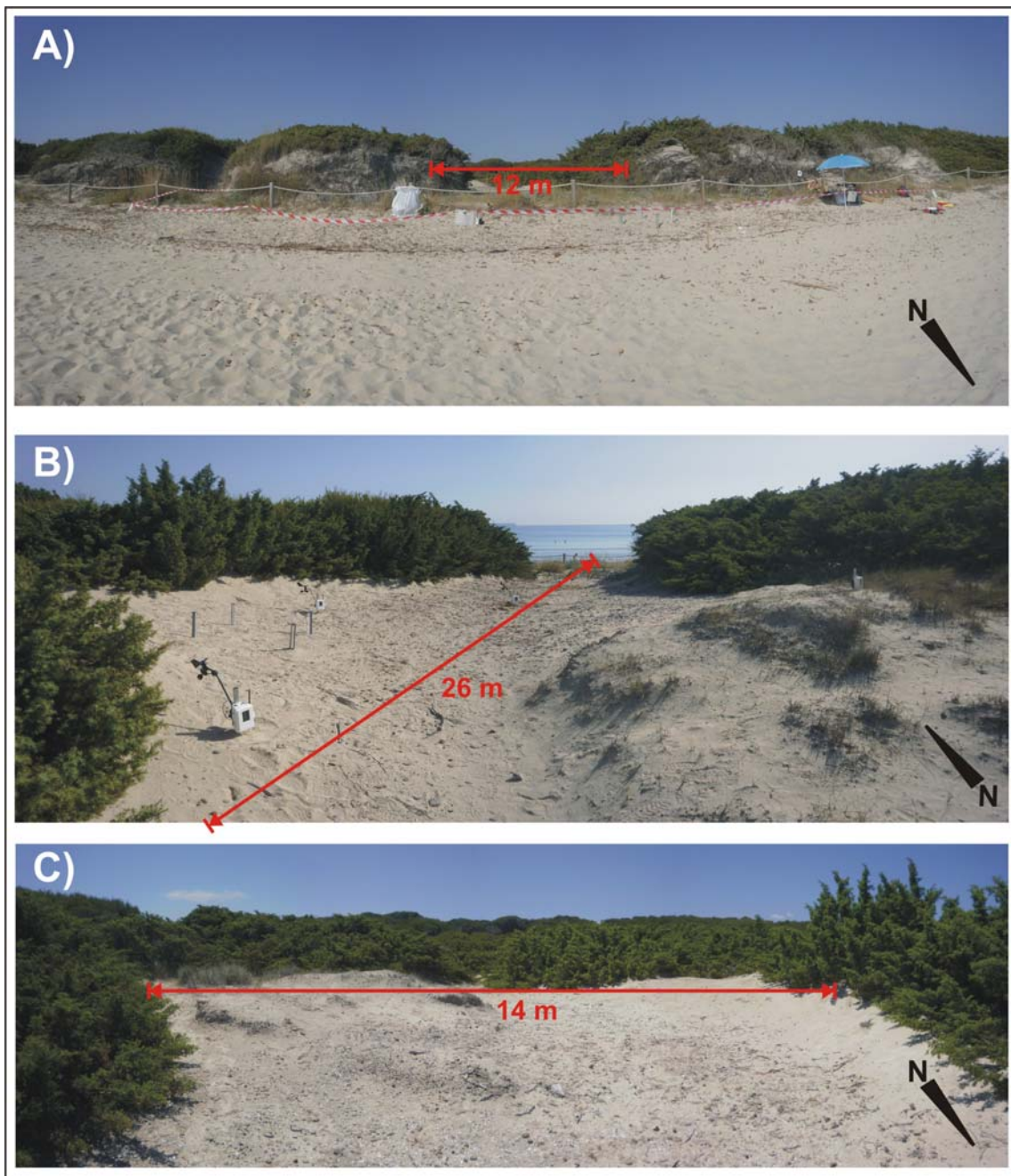


**Figura 153:** Localització geogràfica i context físic del *blowout* analitzat al sistema platja-duna d'es Comú de Muro (Mallorca). Al panell superior dret, sobre la fotografia aèria, es localitza geogràficament la morfologia vers al marc del sistema en la seva integritat. L'esquema geomorfològic l'emmarca dins la franja de dunes mòbils, no obstant en aquest cas, tal i com es pot veure a la imatge inferior sobre la fotografia aèria, quedant molt condicionat per la densa massa de vegetació llenyosa - arbustiva.

Cap remarcar que tot i la seva localització dins la franja de dunes mòbils, en aquest cas, degudes les característiques intrínseques al sistema, no es parla d'un emplaçament dinàmic des del punt de vista sedimentari, sinó contràriament d'un espai limitat pel que fa a la densa vegetació existent, principalment *Juniperus oxydecrus* subs. *macrocarpa*. Aquest fet, junt a altres factors limitants que s'aniran desglossant posteriorment, suposa parlar d'un *blowout* certament estabilitzat i amb dificultats a l'hora de mostrar cert dinamisme.

En tant a la seva caracterització física, d'acord a la classificació establerta a l'epígraf 3.1.1.2.5., el *blowout* objecte d'estudi queda emmarcat dins les formes mixtes – *mixed shapes* – presentant una estructura de *trough blowout* a la part exterior, amb

forma de corredor, i una forma circular o semi circular a la part interior, característica de les morfologies *saucer* (veure Figura 74 a l'epígraf 3.1.1.2.5.). Aquesta estructura dibuixa dues zones diferenciades; en primer lloc una zona controlada per una tendència més erosiva, que es correspon amb la cubeta de deflació – corredor central –, i en segon lloc una zona d'acumulació, localitzada a la part interior.



**Figura 154:** Panoràmiques del *blowout* en el sistema d'es Comú de Muro (Mallorca). La imatge (A) ofereix una vista frontal de la morfologia, vista des de la platja, i la qual indica la seva amplada en boca – *throat* –. La segona imatge (B) ofereix la vista inversa, des de l'interior del *blowout*, indicant la longitud total de la morfologia. Finalment, la darrera imatge (C) mostra l'amplada de la part més interior.

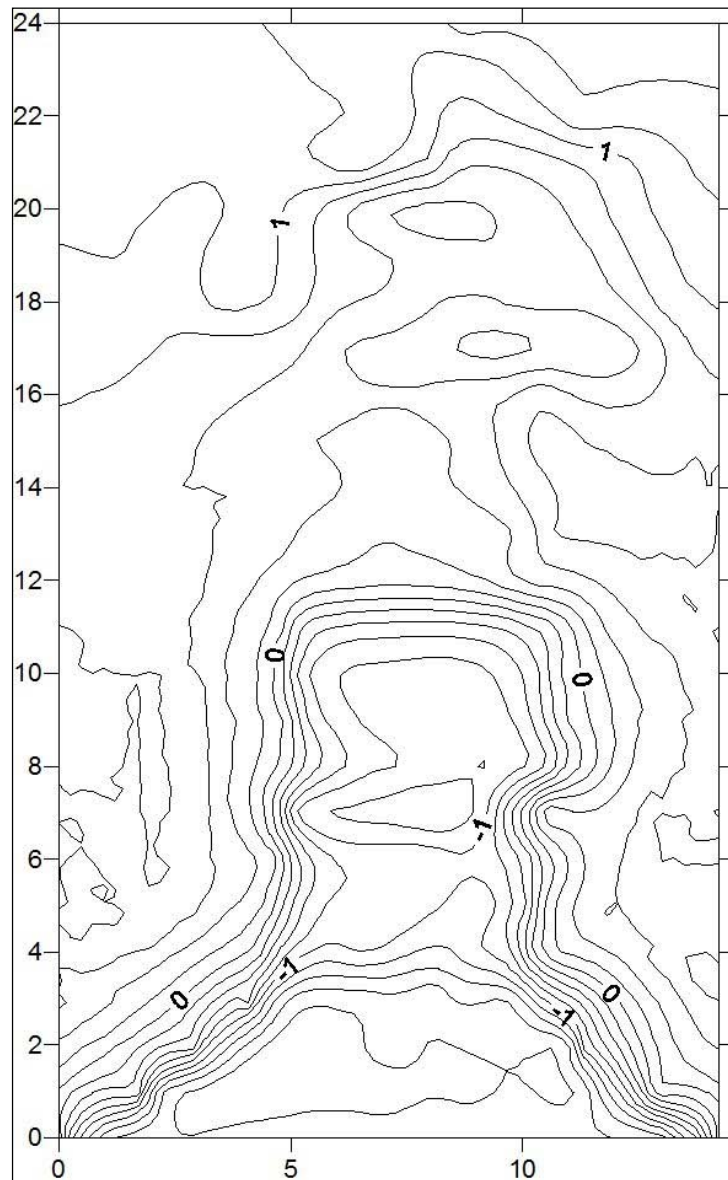
El *blowout* es desenvolupa terra endins partint des del front de duna, fent límit amb la platja emergida. Atenent a la seva morfologia, presenta amplades divergents. La seva boca – *throat* – presenta una amplada de 12 m de longitud, que s'estendrà de forma similar al llarg del corredor central (Figura 154A). No obstant, al seu interior, coincidint amb la zona circular característica de les formes *saucer*, s'hi troba la màxima amplada, fixada amb 14 m (Figura 154C). La longitud total queda fixada en 26 m (Figura 154B) dels quals 16 m, aproximadament, es corresponen amb la canal de deflació, mentre que els 10 m restants ho fan amb la zona de deposició. El *blowout* es desenvolupa seguint el pendent rampant del sistema, però en cap cas presenta una zona de socavament. Aquest fet suposa que el control topogràfic sigui inexistent, sent doncs la vegetació arbustiva el límit “topogràfic” en cada un dels laterals (aquest fet es percep a la Figura 154, sobretot a les imatges B i C).

D'acord amb la direccionalitat seguida per bona part de les 58 morfologies *blowout* existents al front dunar d'es Comú de Muro (epígraf 3.1.1.2.2.) l'orientació d'aquest cas concret es fixa en 45°, seguint una direcció NE-SO, condicionada per tant pels vents predominants incidents sobre aquesta zona, de component NE.



**Figura 155:** Imatge de la primera línia, entre la platja alta i el front de duna. Com es percep a la imatge avui dia és inexistent qualsevol signe de *foredune*. Així sols es veu la presència d'alguns individus d'espècies herbàcies, principalment *Ammophila arenaria*, i en conseqüència, algunes *shadow* o *echo dunes*.

L'alteració del sistema, sobretot de la seva part frontal, fa que la gradació natural d'aquests ambients en sigui inexistent. A conseqüència, la distància entre la platja i la primera duna és mínima. Una dels efectes passa per la manca notable d'una primera línia de dunes o *foredunes*, sent aquesta reduïda a la presència de formacions arenoses totalment embrionàries, i en molt casos també efímeres, que es veuen fixades principalment per *Ammophila arenaria* (Figura 155).



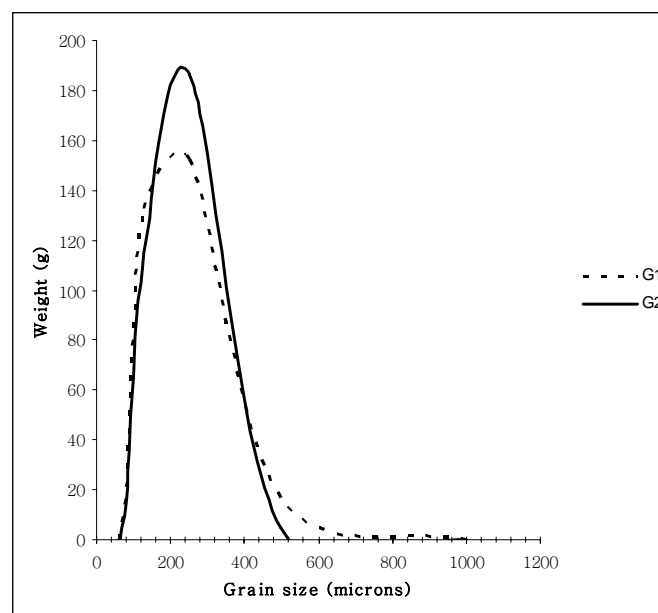
**Figura 156:** Mapa topogràfic del *blowout* d'es Comú de Muro.

En la caracterització topogràfica d'aquesta morfologia pot ser s'hi trobi una de les seves particularitats a destacar. Si per definició els *blowouts* solen presentar una zona de socavament, en aquest cas aquesta és quasi inexistent. Tal i com mostra la Figura



156 es presenta com una zona notablement plana, disminuint a la màxima potència la influència que la topografia en pugui tenir vers a la caracterització, per exemple, del flux eòlic incident. Com ja s'ha mencionat anteriorment, no es percep la presència de parets laterals que encaixin el *blowout* en sí mateix, sinó que en aquest cas els límits queden fixats per la presència de vegetació llenyosa (Figura 154B i C). Amb aquest escenari doncs, ens trobem davant un cas que no s'assimila a la definició teòrica de morfologies *blowout* des del punt de vista geomorfològic i topogràfic, però sí que ho fa en tant al paper que pot desenvolupar vers a la dinàmica sedimentària i eòlica del sistema; és a dir, d'establir-se com un "corredor" el qual, sota la incidència dels vents predominants, facilita el transport de sediment des de la platja alta cap a l'interior del sistema de dunes fixades.

En tant a sediment existent a la zona d'estudi, es tracta d'arenas calcàries bioclàtiques, des del punt de vista granulomètric emmarcades dins arenas mitjanes – fines. En aquest cas no es perceben notables diferències entre les mostres preses en les dues localitzacions; G<sub>1</sub> i G<sub>2</sub> (veure localització dels punts de mostreig a la Figura 47, epígraf 2.4.3.) Pel que fa al primer cas un 50.8% de la mostra es caracteritza per arenas mitjanes, el 43.2% d'arenas fines, i sols el 5.7% per arenas gruixades, mentre que en el cas de G<sub>2</sub> aquesta distribució, seguint el mateix ordre, es fixa en un 62.2%, 36.1% i 1.6% respectivament (Taula 50 i Figura 157).



**Figura 157:** Distribució de la mida de gra en cada un dels punts mostrejats a partir de Folk i Ward (1957).

	G1	G2
ANALYST AND DATE:	, 5/23/2012	, 5/23/2012
SIEVING ERROR:	-0,2%	0,0%
SAMPLE TYPE:	Unimodal, Moderately Well Sorted	Unimodal, Moderately Well Sorted
TEXTURAL GROUP:	Sand	Sand
SEDIMENT NAME:	Moderately Well Sorted Medium Sand	Moderately Well Sorted Medium Sand
Folk and Ward Method	Medium Sand	Medium Sand
	Moderately Well Sorted	Moderately Well Sorted
	Symmetrical	Fine Skewed
	Platykurtic	Platykurtic
% COARSE SAND:	5,7%	1,6%
% MEDIUM SAND:	50,8%	62,2%
% FINE SAND:	43,2%	36,1%

**Taula 50:** Descripció de les mostres d'arena segons Folk i Walk (1957).

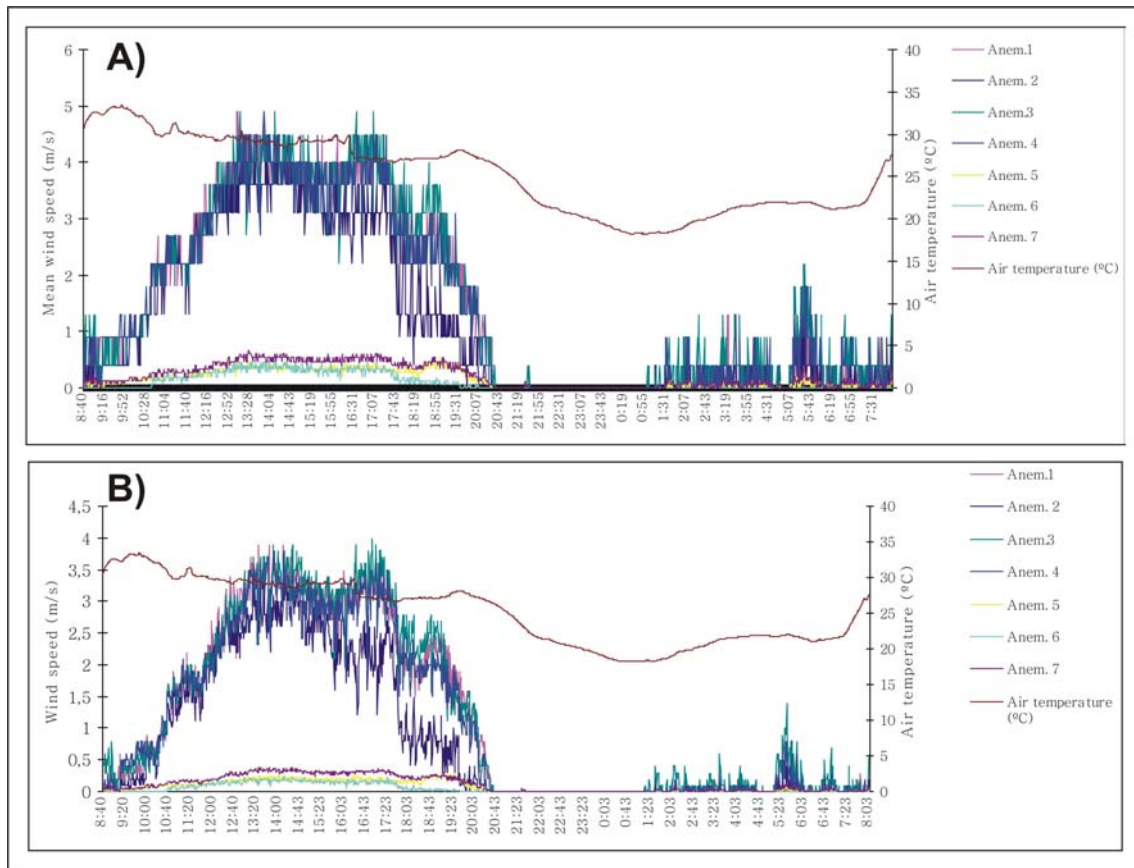
Tal i com estableix la Taula 50, en ambdós casos es tracta d'arenes mitges moderadament ben ordenades - *moderately well sorted* – i amb una distribució platicúrtica pel que fa a la seva curtosis. Segons l'aplicació de Folk i Ward (1957) la mida mitjana de les mostres preses es força similar, situades en:  $G_1 = 276.1\mu$  i  $G_2 = 276\mu$ .

#### 4.1.2. Dinàmica eòlica (situació meteorològica d'estiu)

##### *4.1.2.1. Velocitat del vent. Dades de màximes i mitjanes*

La campanya fou realitzada entre els dies 27 i 28 de juny de 2012 amb 24 h de seguiment continu. La dinàmica eòlica registrada al llarg de l'experiment mostra una variabilitat considerable al llarg de la seva durada (Figura 158). Si aquesta es contempla des de la perspectiva temporal es veu que, tant en les velocitats mitjanes com en les màximes, les intensitats més fortes es donen al llarg del matí de dia 27 de juny. És a partir de les 10:00 h quan les velocitats inicien el seu increment progressiu per arribar al voltant de les 13:00 h als seus registres màxims, els quals s'estenen fins a les 18:00 h aproximadament – envers a les velocitats màximes mitjanes aquests es situen entre els  $4\text{-}5\text{ ms}^{-1}$  (Figura 158A), mentre que en les mitjanes ho fan entre els  $3\text{-}4\text{ ms}^{-1}$  (Figura 158B) – . A partir d'aquest moment, i també coincidint amb una baixa de la temperatura atmosfèrica, la velocitat del vent comença a disminuir, també progressivament, i de

manera generalitzada en tots els sensors. En el període comprès entre les 21:00 h i les 01:00 h – ja del dia 28 – veiem com el vent en fou totalment inexistent, amb una pronunciada situació de calma. No obstant, a partir de les 01:00 h de dia 28 es torna a reactivar tímidament el vent, no obstant amb intensitats molt baixes que no superen els  $2 \text{ ms}^{-1}$  en el cas de les màximes (Figura 158A), i just el  $1 \text{ ms}^{-1}$  en el cas de les mitjanes (Figura 158B).



**Figura 158:** Velocitat del vent al llarg de les 24 h de mostreig per l’experiment d’estiu a es Comú de Muro (Mallorca). El primer panell (A) fa referència a la distribució temporal de les velocitats màximes enregistrades per cada anemòmetre, mentre que l’inferior (B) fa el propi amb les velocitats mitjanes.

D’igual manera la Figura 158 també és un bon reflex per a veure i percebre les diferències existents espacialment parlant. Si es recorda de la distribució dels sensors en aquest cas d’estudi (veure Figura 53 de l’epígraf 2.4.4.1.), les màximes intensitats – tant en els seus valors màxims com mitjans – es donen als anem. 1 (situat a la part alta de la platja, esdevenint l’anemòmetre de referència envers a les condicions inicials d’input), i els anem. 2 i 3 (ambdós situats al llarg del canal de deflació). En una situació intermèdia es troba l’anem. 2 (localitzat a la part posterior de les dunes embrionàries i la vegetació herbàcia en primera línia). Finalment, les mínimes intensitats es situen a la

part posterior del *blowout*, a la zona semi-circular *saucer*, registrades pels anem. 5, 6 i 7. Aquesta tendència es veu numèricament a la Taula 51. En ambdues variables – velocitats mitjanes i màximes – les intensitats eòliques més altes foren registrades per l’anem. 3 (canal de deflació), amb  $1.2 \text{ ms}^{-1}$  i  $1.5 \text{ ms}^{-1}$  respectivament. Destacar també els valors assolits pels anem. 1 i 4, propers als esmentats. Pel que fa a les intensitats més baixes, aquestes foren també en ambdues variables registrades per l’anem. 6 (part posterior del *blowout*) amb  $0.4 \text{ ms}^{-1}$  i  $0.7 \text{ ms}^{-1}$ . En aquest cas s’hi assimilen, corroborant el mencionat anteriorment, les intensitats mostrades pels anem. 5 i 7.

	Velocitats mitjanes	Velocitats màximes
Anem. 1	1,1	1,4
Anem. 2	0,8	1,1
Anem. 3	1,2	1,5
Anem. 4	1,0	1,4
Anem. 5	0,7	1,0
Anem. 6	0,4	0,7
Anem. 7	1,0	1,4

\* Valors expressats en  $\text{ms}^{-1}$

**Taula 51:** Valors mitjans de les velocitats de vent mitjanes i màximes per a cada anemòmetre al llarg de les 24 h de mostreig. Valors de la situació d’estiu a es Comú de Muro (Mallorca). En vermell apareixen els valors màxims, i en blau els mínims.

En termes generals, i amb caràcter puntual, la velocitat més alta en valors mitjans fou de  $4 \text{ ms}^{-1}$ , registrada per l’anem. 3 a les 16:55 h, i de  $4.9 \text{ ms}^{-1}$  pel que fa als valors màxims, registrada a les 16:35 h també per l’anem. 3. En el període entre les 13:30 h i les 17:00 h es registrà la major intensitat eòlica, sobretot en els anem. 1 i 3. Pel que fa al primer cas la intensitat eòlica en aquest període fou de  $2.8 \text{ ms}^{-1}$  en valors mitjans, i de  $3.2 \text{ ms}^{-1}$  envers als seus valors màxims. En el cas de l’anem. 3 aquests valors s’incrementen a  $3.2 \text{ ms}^{-1}$  en tant a les mitjanes i a  $3.9 \text{ ms}^{-1}$  pel que fa a les màximes.

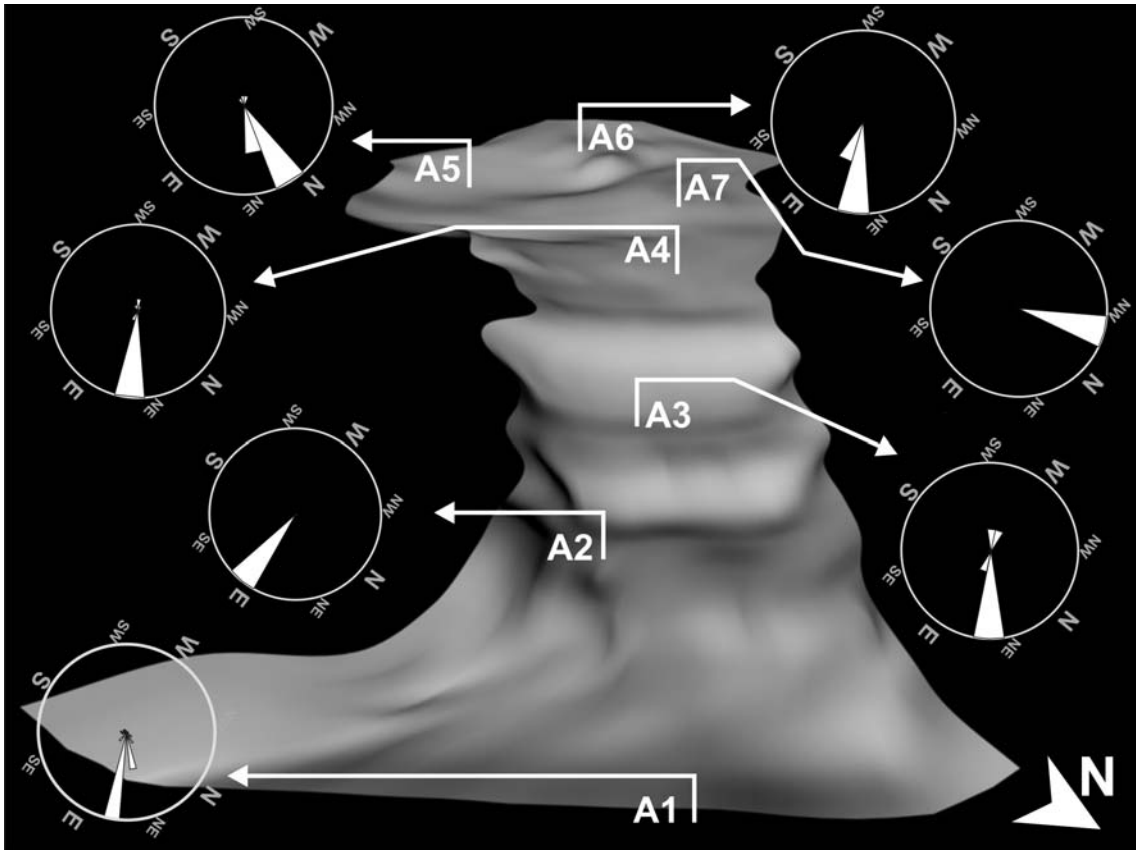
#### 4.1.2.2. Direcció

Tenint en compte l’anem. 1, situat a la part alta de la platja emergida i que ens indica les condicions inicials del vent abans de que aquest entri dintre de la pròpia morfologia *blowout*, la direcció mitjana al llarg de l’experiment fou de component ENE-E, concretament fixada en  $78^\circ$  (Taula 52), no obstant amb algunes puntes de tendència cap a la component NE (Figura 159).

	Anem. 1	Anem.2	Anem. 3	Anem. 4	Anem. 5	Anem. 6	Anem. 7
<b>Direcció mitjana</b>	78	113	110	86	49	52	338

\*Valor en graus (°)

**Taula 52:** Direcció mitjana del vent al llarg de les 24 h d'experiment per a cada un dels sensors desplegats. Experiment d'estiu, es Comú de Muro (Mallorca).



**Figura 159:** Roses de direccions del vent al llarg de les 24 h de mostreig per a cada un dels 7 sensors desplegats. Experiment d'estiu a es Comú de Muro (Mallorca).

La tendència direccional del flux eòlic un cop aquest s'endinsa dintre del *blowout* és homogènia i prou definida, tal i com es reflecteix a la Figura 159. A l'anem. 2 ja es comença a canalitzar la direcció del flux amb una component predominant E, amb certa tendència al ESE. Aquesta es veurà finalment canalitzada als anem. 3 i 4, ambdós situats de ple dins del canal de deflació, i amb direccions predominants que es situen dins el quadrant ENE – seguint l'orientació del propi *blowout* –. No obstant, si d'aquests tres darrers casos en comparem les seves direccions mitjanes (a la Taula 52) amb les seves direccions predominants (a la Figura 159) es poden percebre lleugeres desavinences. L'anem. 2 mostra una direcció predominant de component E, mentre que

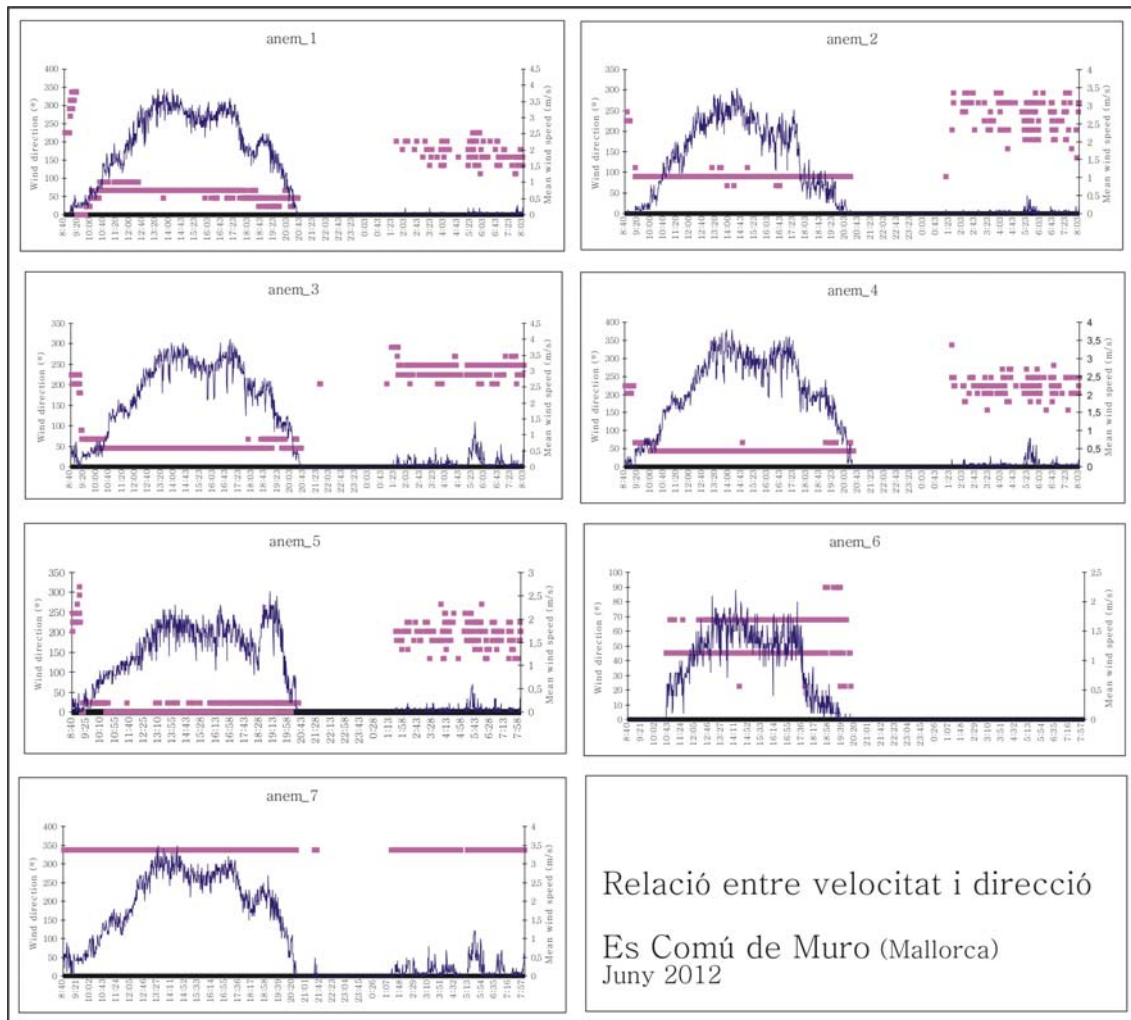
una mitjana de component ESE (113 °). En el cas de l'anem. 3 la dominant és de component ENE, mentre que la mitjana es situa a la component ESE (110°). Finalment, en el cas de l'anem. 4 la dominant és de component ENE, mentre que la mitjana és de E (86°).

La situació canvia si s'analitza el succeït a la part posterior del *blowout* – zona circular, en forma de *saucer* –. L'anem. 6, situat al final de la morfologia segueix en certa mesura la direcció iniciada per la canalització del flux al llarg de la cubeta de deflació (ENE). A mode de justificació cal dir que aquest sensor es situa just a l'inici d'un caminet el qual ajuda a la descompressió del flux terra endins, que per pressió estàtica de la topografia existent al voltant és l'única zona d'escapament possible. Els casos més curiosos són els anem. 5 i 7. En el primer cas la direcció predominant és de N-NE (49°), mentre que en el segon aquesta és de component NNO (338°). Aquest fet suggereix pensar amb la importància que té, en primer lloc la morfologia adoptada a la part interior del *blowout* – forma circular –, i en segon lloc el paper que juga la topografia, a través de la pressió estàtica, vers el flux eòlic incident. Aquesta situació es desenvoluparà amb més profunditat a l'epígraf 4.1.2.3., fent referència específica al comportament del flux eòlic dintre de la morfologia *blowout*.

Si s'analitzen les direccions enregistrades individualment per a cada un dels 7 sensors desplegats caben algunes consideracions a comentar (Figura 160). A grans trets la tendència seguida pels anem. 1, 2, 3, 4 i 5 és força similar, amb una notable coincidència temporal. A primera hora, entre les 08:40 h - 09:30 h aproximadament, veiem com la component generalitzada és mou entre els 200°-300° (SSO-ONO), i coincideix amb vents que just superen, en els moments de màxima intensitat, l'1 ms<sup>-1</sup>. L'increment generalitzat de les velocitats, iniciat aproximadament sobre les 10:00 h i que s'estendrà fins a les 20:00 h, du en sí un canvi de component direccional, en aquest cas també força uniforme al llarg dels anemòmetres esmentats, oscil·lant entre els 0° (N) i els 100 ° (NE). L'anem. 1 és el que experimenta una major divergència en aquest període, amb predominança de la component NNE. Els anem. 2, 3 i 4 concentren la seva direcció entre els 50° - 100°, mentre que l'anem. 5 contempla principalment una direcció 0° - 25 ° (NNE). Finalment, i després de la nul·la activitat existent entre les 21:00 h i les 01: 00 h – comentada a l'epígraf 4.1.2.1. –, les direccions tornen a emmarcar-se entre els 180° - 300 ° (S-ONO), coincidint de nou amb una intensitat eòlica notablement baixa que just supera l'1ms<sup>-1</sup>. Concloent, durant el període de

mostreig, en moments d'intensitat energètica baixa la component predominant oscil·la entre S-ONO, mentre que amb intensitats més altes aquesta es mou entre N-ESE.

Els anem. 6 i 7 presenten situacions un tant distintes. En el primer cas l'activitat eòlica registrada es limita a les hores centrals, període a on les velocitats són superiors (10:00 h – 20:00 h). Les direccions predominants són de component NE (45°) i ENE (70°). L'anem. 7 pot ser presenta el cas més significatiu al mostrar una predominança absoluta de vents de component NNO, concretament fixada en els 338°. La seva localització, condicionada per la morfometria circular de la part interior del *blowout* i la “barrera” de la topografia limítrofa, suggereix l'explicació de tal comportament – veure més a l'epígraf 4.1.2.3. –



**Figura 160:** Relació existent – en escala temporal – entre la velocitat i la direcció enregistrada per cada un dels anemòmetres utilitzats. Experiment d'estiu (27-28 de juny de 2012) a es Comú de Muro (Mallorca).

#### 4.1.2.3. Flux eòlic intern

El comportament del flux eòlic dintre el *blowout* d'es Comú de Muro a la campanya d'estiu està íntimament lligat als registres direccionals marcats per cada un dels sensors desplegats, ja explicats a l'epígraf anterior. No obstant, caben algunes consideracions en tant a l'efecte que la pròpia topografia en té al respecte. Amb tot, i abans d'entrar a valorar-ne el comportament pròpiament dit, cal esmentar que aquest, a diferència del que s'estudia a Cala Tirant, Menorca (veure posteriorment als epígrafs 4.2.2.3. i 4.2.3.3.), no esdevé un *blowout* pròpiament definit des del punt de vista topogràfic, però sí des del punt de vista funcional vers al flux eòlic i als patrons de transport sedimentari. A diferència del que estableixen les definicions clàssiques, no parlem d'una morfologia totalment activa, donada sobre una superfície d'arena lliure i amb una zona d'erosió notablement diferenciada d'una zona de deposició. No obstant es tracta d'una "fractura" existent a primera línia del sistema dunar, condicionada sols per la presència d'una massa de vegetació arbustiva densa – principalment *Juniperus oxycedrus* subs. *macrocarpa* – que exerceix el paper de la topografia encaixada pròpia de morfologies *blowout* – vendria a jugar el paper que en puguin jugar les parets laterals, per exemple en el cas de Cala Tirant –. Aquest fet explica, per exemple, que la seva topografia sigui molt suau, sense una zona deprimida resposta dels processos erosius (veure Figura 156).

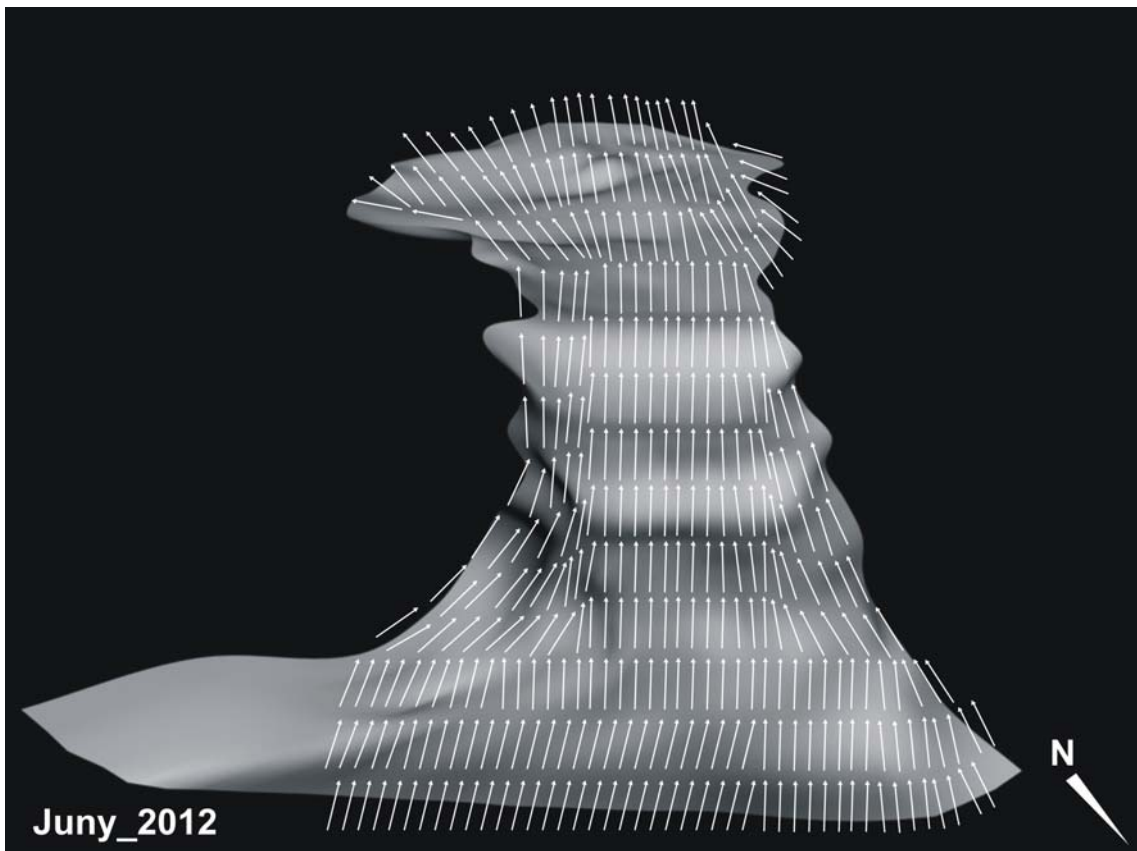
En termes generals, el flux eòlic un cop entra al *blowout* és força senzill i homogeni, sobretot en la seva part exterior (Figura 161). L'input de vent registrat a la part alta de la platja emergida – corresponent a l'anem. 1 – té una component principal de ENE la qual esdevé homogènia fins a la boca – *throat* – per a després sofrir una notable canalització al llarg del canal de deflació. No obstant, s'observa com als laterals d'aquest es produeix una compressió i un reajustament del flux, condicionat alhora per les parets laterals – en aquest cas massa de vegetació arbustiva –. Aquest fet és el que explica que, en aquest cas particular, la densa vegetació té el paper funcional de la pressió topogràfica exercida per la topografia dunar pròpiament dita.

L'obertura topogràfica de la forma circular existent a la part interior del mateix esdevé el factor que explica la descompressió del flux i la seva divergència, sobretot a la part meridional, a on s'hi localitza l'anem. 5. Aquest, ajudat per la morfologia circular, registra una direcció principal de component N, mentre que a la part central en segueix la canalització iniciada al canal de deflació, descomprimint de cap a la part més interior,



a on s'hi situa l'anem. 6. Cal indicar que en aquest punt també s'hi troba un camí que es dirigeix de cap a l'interior del sistema dunar, amb una orientació NE-SO, ajudant a la descompressió del flux, tal i com registra l'anem. 6, amb una direcció principal del NE.

El fet més particular és el que s'esdevé a la part oriental de la forma circular interior, a on es localitza l'anem. 7, i es registra una direcció sostinguda de component NO (Figura 161). Si en aquest cas es seguís la tendència de descompressió registrada a l'altra banda, la direcció hauria de ser inversa a la donada. Així, la hipòtesi que ens permet explicar-ne aquesta desavinença passa pel control topogràfic, en aquest cas exercit per la densa massa de vegetació. En termes generals la direcció dels vents donats al llarg de les 24 h d'experiment s'emmarca dins la component N-NE, de la qual la zona meridional del *blowout* en queda protegida deguda la vegetació. Sota aquesta situació, un cop el flux hi arriba es veu condicionat per la pressió estàtica de la vegetació, obligant-lo a descomprimir de cap a la part posterior de la morfologia, redireccionant-lo sota una component N-NW (Figura 159 i 161).



**Figura 161:** Modelització extrapolada del flux intern dintre de la morfologia *blowout*. Experiment d'estiu a es Comú de Muro (Mallorca).



**Figura 162:** Representació esquemàtica del comportament del flux eòlic a la part interior del blowout d'es Comú de Muro (Mallorca) al llarg de l'experiment de juny de 2012.

#### 4.1.2.4. Variabilitat d'intensitat a partir de la variable altura; Fractional speed-up ratio

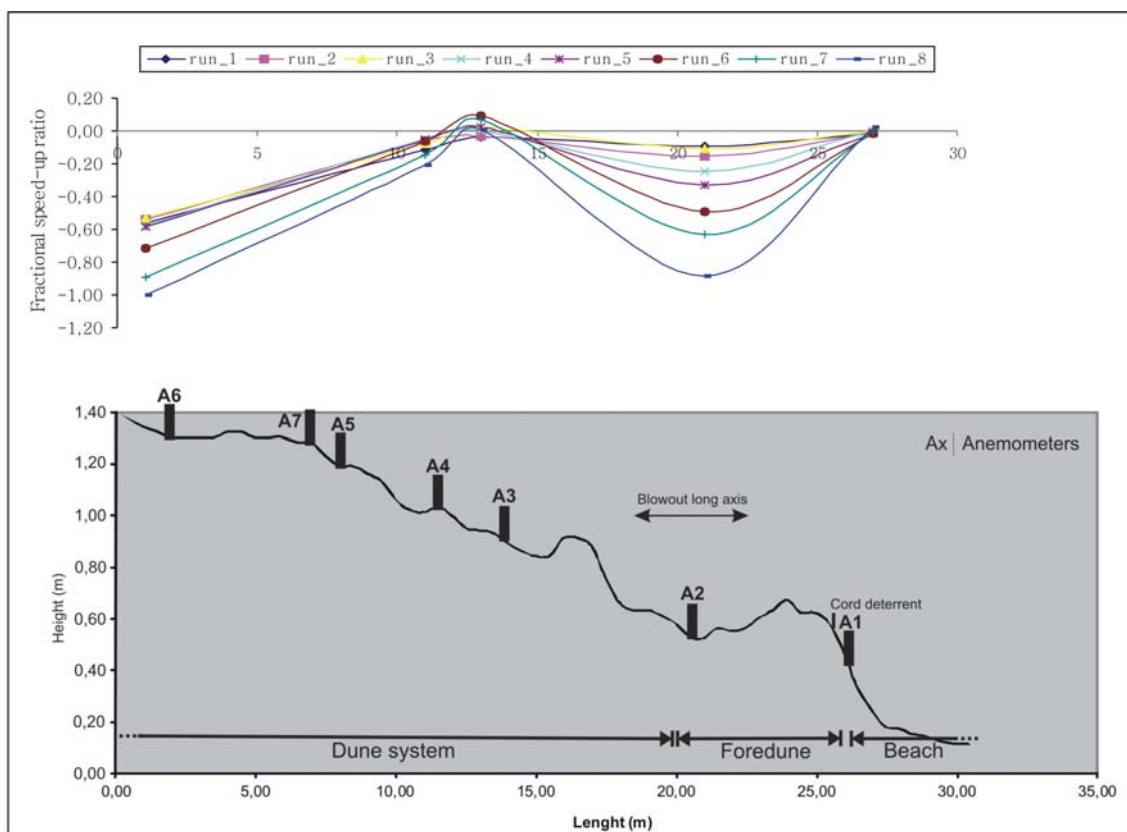
L'efecte de la topografia també queda reflectit de l'anàlisi de la velocitat del flux estandarditzada a partir de la variable altura. En el cas de l'experiment dut a terme al *blowout* d'es Comú de Muro al juny de 2012 (estiu) el càlcul del *fractional speed-up ratio* (veure'l explicat a l'epígraf 2.4.4.2.) es du a terme a partir de 8 moments de mostreig – *runs* – d'una durada de 20 min cada un (Taula 53 i Figura 163). Els anemòmetres utilitzats per a tal càlcul són els 1, 2, 3, 4 i 5. Els anem. 6 i 7 han estat descartats ja que no es troben desplegats al mateix axis. En una primera aproximació les variacions vers a la velocitat del flux al llarg del *blowout* són homogènies i constants tant temporal com espacialment. Partint de les condicions inicials del flux registrades per l'anem. 1 – en aquest cas de  $\delta s = 0$  –, aquest experimenta una disminució considerable a l'anem.2, situat just a la part posterior de la vegetació herbàcia i les morfologies embrionàries existents en primera línia, presentant un valor mitjà de  $\delta s \chi = -0.37$ , el més baix de la mostra. Un cop superat aquest punt es produeix un increment considerable de la velocitat al llarg del canal de deflació, sobretot registrat per l'anem. 3, amb  $\delta s \chi = 0.02$  – el més elevat – i també, tot i que amb una lleugera disminució, per l'anem. 4;  $\delta s \chi = -0.10$ . Finalment l'anem. 5 registra una disminució, en aquest cas també notable, de la velocitat del flux responent al procés d'expansió i descompressió a la part interior del *blowout* (Figura 163), expressada per  $\delta s \chi = -0.37$ .

	RUN_1 (12:15-12:35)		RUN_2 (13:16-13:36)		RUN_3 (14:16-14:36)		RUN_4 (15:36-15:56)		RUN_5 (16:37-16:57)		RUN_6 (17:36-17:56)		RUN_7 (18:36-18:56)		RUN_8 (19:37-19:57)		$\delta s \chi$	$\delta s \sigma$	
	Lenght	$u_z$	Ratio	$u_z$	Ratio	$u_z$	Ratio	$u_z$	Ratio	$u_z$	Ratio	$u_z$	Ratio	$u_z$	Ratio	$u_z$			Ratio
Anem. 1	27	2,8	-0,02	3,4	-0,01	3,4	0,00	2,9	0,00	3,3	-0,01	2,3	-0,01	2,3	-0,01	1,3	0,02	0,00	0,01
Anem. 2	21	2,5	-0,09	2,9	-0,16	3,0	-0,11	2,2	-0,24	2,2	-0,33	1,2	-0,49	0,8	-0,63	0,1	-0,89	-0,37	0,28
Anem. 3	13	2,7	-0,04	3,3	-0,03	3,5	0,03	2,9	0,00	3,4	0,02	2,5	0,09	2,5	0,07	1,3	0,01	0,02	0,04
Anem. 4	11	2,5	-0,12	3,2	-0,06	3,1	-0,08	2,8	-0,04	3,1	-0,05	2,2	-0,06	2,0	-0,15	1,0	-0,21	-0,10	0,06
Anem. 5	6	1,4	-0,48	1,9	-0,45	1,8	-0,47	1,7	-0,42	1,7	-0,48	1,4	-0,38	2,0	-0,11	1,0	-0,19	-0,37	0,14
Anem. 6	1	1,2	-0,56	1,6	-0,54	1,6	-0,53	1,2	-0,58	1,4	-0,59	0,7	-0,71	0,2	-0,89	0,0	-1,00	-0,67	0,18
Anem. 7	6	2,3	-0,18	3,0	-0,12	3,0	-0,12	2,6	-0,11	2,8	-0,15	2,1	-0,07	2,2	-0,04	1,4	0,05	-0,09	0,07
$\delta s \chi$			-0,21		-0,20		-0,18		-0,20		-0,23		-0,23		-0,25		-0,32		
$\delta s \sigma$			0,22		0,21		0,23		0,23		0,24		0,30		0,36		0,44		
Anem. 1 (ref)		2,8		3,4		3,4		2,9		3,3		2,3		2,3		1,3			

**Taula 53:** Velocitat mitjana del vent per cada un dels anemòmetres despleats ( $u_z$ ) i els seus respectius valors estandarditzats de l'aplicació del *fractional speed-up ratio* ( $\delta s$ ) calculats a partir de 8 moments de mostreig – *runs* – de 20 min de durada. Addicionalment es presenta la mitjana ( $\delta s \chi$ ) i la desviació estàndard ( $\delta s \sigma$ ) per cada sensor i per cada moment de mostreig. Experiment d'estiu a es Comú de Muro.

En tant a la variabilitat registrada per cada un dels punts de mostreig al llarg dels 8 *runs*, el valor màxim es contempla a l'anem. 2, amb  $\delta s = -0.09 / -0.89$ , i a l'anem. 5, amb  $\delta s = 0.11 / -0.48$ , mentre que la mínima es dona als dos situats al llarg de la cubeta de deflació; anem. 3 ( $\delta s = -0.03 / 0.09$ ) i anem. 4 ( $\delta s = -0.21 / -0.04$ ). Si s'observa la desviació estàndard, el màxim valor coincideix amb el punt de màxima variabilitat, és a dir l'anem. 2 amb  $\delta s \sigma = 0.28$ , destacant també la de l'anem. 5, amb  $\delta s \sigma = 0.14$ . Finalment, el valor de màxima velocitat – estandarditzada – és de  $\delta s = 0.09$ , registrat a l'anem. 3 durant del *run* 6, mentre que la mínima es troba al *run* 8, registrada per l'anem. 2 amb  $\delta s = -0.89$ .

Des de la perspectiva temporal es pot veure com el màxim valor es localitza al *run* 3, amb  $\delta s \chi = -0.18$ , mentre que la mínima queda reflectida als *run* 8 ( $\delta s \chi = -0.32$ ), *run* 7 ( $\delta s \chi = -0.25$ ) i *run* 5 i 6 ( $\delta s \chi = -0.23$ ) (Taula 53).



**Figura 163:** *Fractional speed-up ratio* dintre de la morfologia *blowout* d'es Comú de Muro en l'experiment d'estiu. Els perfils longitudinals estan fets a partir dels anem. 1, 2, 3, 4 i 5, prenent com a referència l'anem. 1. Els anem. 6 i 7 no s'inclouen a la gràfica ja que no estaven disposats en el mateix transecte longitudinal.

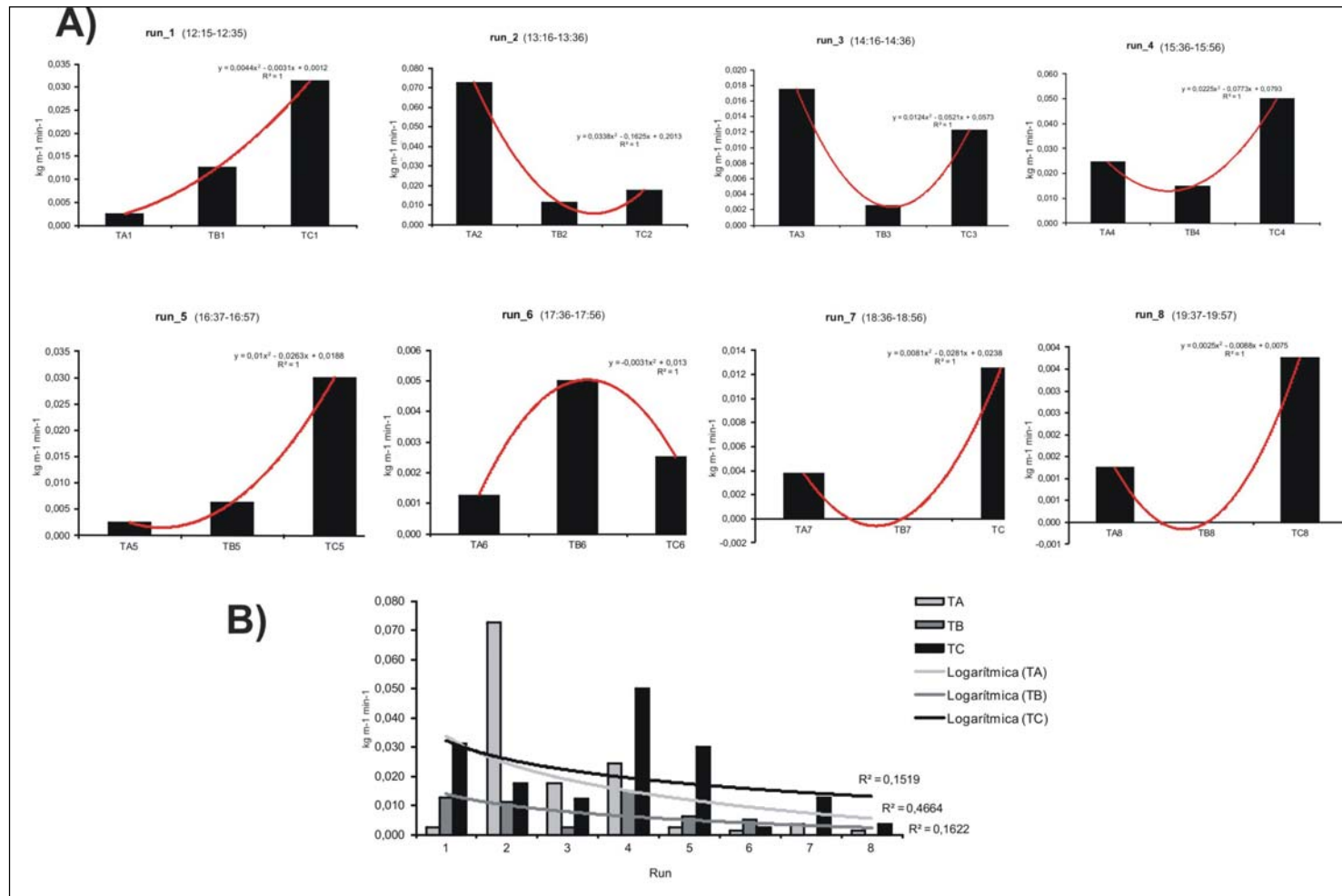
4.1.3. Dinàmica sedimentaria (situació d'estiu)

*4.1.3.1. Transport de sediment*

En termes generals, la baixa intensitat energètica registrada al llarg de la campanya de juny de 2012 (estiu) a es Comú de Muro feu que el transport de sediment en fou gairebé inexistent, o si més no, molt baix. El càlcul del transport de sediment es fa, a l'igual que en el cas del *fractional speed-up ratio* (epígraf 4.1.2.4.), a partir de 8 moments de mostreig – *runs* – de 20 min de durada cada un (Taula 54 i Figura 164A).

Run	TA	TB	TC
	Valors en kg m <sup>-1</sup> min <sup>-1</sup>		
1 (12:15 - 12:35 h)	0,003	0,013	0,031
2 (13:16 - 13:36 h)	0,073	0,011	0,018
3 (14:16 - 14:36 h)	0,018	0,003	0,012
4 (15:36 - 15:56 h)	0,025	0,015	0,050
5 (16:37 - 16:57 h)	0,003	0,006	0,030
6 (17:36 - 17:56 h)	0,001	0,005	0,003
7 (18:36 - 18:56 h)	0,004	0,000	0,013
8 (19:37 - 19:57 h)	0,001	0,000	0,004

**Taula 54:** Quantitats de sediment registrades per cada grup de trampes (TA, TB, TC) en cada un dels respectius *runs* mostrejats. Experiment de juny de 2012, es Comú de Muro (Mallorca).



**Figura 164:** Distribució espacial del transport de sediment experimentat en cada un dels *runs* per a cada grup de trapes. A la imatge superior A) es mostra la situació específica per a cada *run*, mentre que al B) es dona la visió de conjunt.

En aquest cas el transport fou totalment inexistent en velocitats inferiors als  $2 \text{ ms}^{-1}$  – per aquest motiu els mostrejos efectius s’inicien a partir de les 12:25 h –. La màxima de transport fou registrada pel grup TA durant el *run* 1 amb  $Q_{\text{trap}} = 0.073 \text{ kg m}^{-1} \text{ min}^{-1}$ , amb una velocitat mitjana de  $2.7 \text{ ms}^{-1}$  (anem. 1), i al *run* 4 pel grup TC amb  $Q_{\text{trap}} = 0.05 \text{ kg m}^{-1} \text{ min}^{-1}$ , amb  $2.2 \text{ ms}^{-1}$ . Les mínimes es donen al TB durant els *runs* 7 i 8, sense cap registre de transport (Taula 54). La resta de quantitats registrades, generalment, presenten valors que indueixen a un transport notablement insignificant, amb valors molt propers a  $0.00 \text{ kg m}^{-1} \text{ min}^{-1}$ , sobretot de cap a darrera hora, a partir del *run* 5 (Figura 164B).

Des de l’anàlisi temporal existeix una relació positiva envers a les majors quantitats transportades i els moments de major intensitat energètica. Si comparem la primera variable (Taula 54) amb la distribució energètica del vent al llarg de l’experiment (Figura 163) es veu com els *runs* 1, 2, 3 i 4 coexisteixen amb el període de major intensitat, mentre que a partir del *run* 5, les menors quantitats transportades es relacionen amb una disminució generalitzada de la velocitat del vent (al voltant de les 17:00 h). D’aquí al final de l’experiment, amb velocitats mitjanes inferiors als  $1 \text{ ms}^{-1}$ , no es registrà cap tipus de transport.

Aquesta relació no queda manifestada si es considera des d’una perspectiva espacial, ja que els punts de major transport no es corresponen sempre amb els que registren les velocitats més elevades de vent. Generalment les majors quantitats de transport es contemplen a TC – localitzat a la part interior –, mentre que aquestes són inferiors a TA –límit superior de la platja alta– i TB – part posterior de la *foredune* – (Figura 164A). Considerant els anemòmetres de referència per a TA (anem. 1), TB (anem. 2) i TC (anem. 5), la Figura 158 de l’epígraf 4.1.2.1. ens indica que les velocitats més elevades es registraren a l’anem. 3, situat al canal de deflació, suggerint que la zona amb velocitats més elevades no es la de major sedimentació. Com ja s’ha mencionat, i tal i com queda reflectit a la Figura 164A, el grup TC es presenta com el que major transport registrà, amb un total de  $0.160 \text{ kg m}^{-1}$ . No obstant el grup TA, situat a la zona d’input, just a la part superior de la platja alta, registrà una quantitat aproximada fixada en  $0.126 \text{ kg m}^{-1}$ . Finalment, el grup TB, situat a la part posterior de la línia de morfologies embrionàries, experimentà el registre mínim, sols amb un total acumular de  $0.052 \text{ kg m}^{-1}$ .

La relació existent entre la quantitat de sediment retinguda per cada trampa – pensem que cada trampa està orientada cap a un dels principals punts cardinals – en

aquest cas no experimenta una tendència nítidament positiva. Cal dir que les baixes condicions energètiques i les, en molts casos, gaire inexistent quantitats de sediment fan difícil aquesta relació, ja que inclús es podrien atribuir a certs “errors induïts” o bé a moments de turbulències espontànies. En termes general existeix una certa relació positiva en els cas de TA i TB, mentre que aquesta no queda palesa pel que fa a TC (Taula 55). En el primer cas, amb una direcció mitjana del vent de 88°; N (anem. 1), les majors quantitats de sediment retingudes es donen a la trampa N ( $0.006 \text{ kg m}^{-1} \text{ min}^{-1}$ ) i a la O ( $0.009 \text{ kg m}^{-1} \text{ min}^{-1}$ ), mentre que en el cas de TB, amb una direcció mitjana registrada per l’anem. 2 de 109°; ESE, la major quantitat fou captada per la trampa E amb  $0.013 \text{ kg m}^{-1} \text{ min}^{-1}$ . El cas de TC és el que més discrepa. Amb una direcció mitjana de 44°; NE (anem. 5), la trampa que major quantitat retingué fou la O, amb  $0.072 \text{ kg m}^{-1} \text{ min}^{-1}$ , no obstant seguida per la trampa N amb  $0.006 \text{ kg m}^{-1} \text{ min}^{-1}$ .

		RUN_1 (08:43- 09:03)	RUN_2 (13:59- 14:19)	RUN_3 (16:04- 16:24)	RUN_4 (17:05- 17:25)	RUN_5 (18:04- 18:24)	RUN_6 (19:04- 19:24)	RUN_7 (20:05- 20:25)	Resum
Direcció mitjana		279 (O- ONO)	67 (ENE)	64 (ENE)	65 (ENE)	48 (NE)	33 (NNE- NE)	37 (NNE- NE)	88 (N)
TA	N	0	0,020	0,01	0,009	0,005	0	0	0,006
	S	0	0,010	0	0,009	0	0	0,005	0,003
	E	0	0,250	0,06	0,04	0,005	0,005	0,01	0,053
	O	0,010	0,010	0	0,04	0	0	0	0,009
Direcció mitjana		229 (SO)	88 (E)	90 (E)	90 (E)	90 (E)	90 (E)	90 (E)	109 (ESE)
TB	N	0,005	0,005	0,005	0,014	0,005	0,02	0	0,008
	S	0,015	0,005	0	0	0	0	0	0,003
	E	0,030	0	0,005	0,04	0,015	0	0	0,013
	O	0	0,035	0	0,005	0,005	0	0	0,006
Direcció mitjana		240 (OSO)	4 (N)	8 (N)	5 (N)	12 (N- NNE)	16 (N- NNE)	21 (NNE)	44 (NE)
TC	N	0,005	0,005	0,03	0	0	0,005	0	0,006
	S	0,040	0	0,005	0	0	0	0	0,006
	E	0	0	0	0	0,005	0	0,025	0,004
	O	0,080	0,065	0,014	0,2	0,115	0,005	0,025	0,072

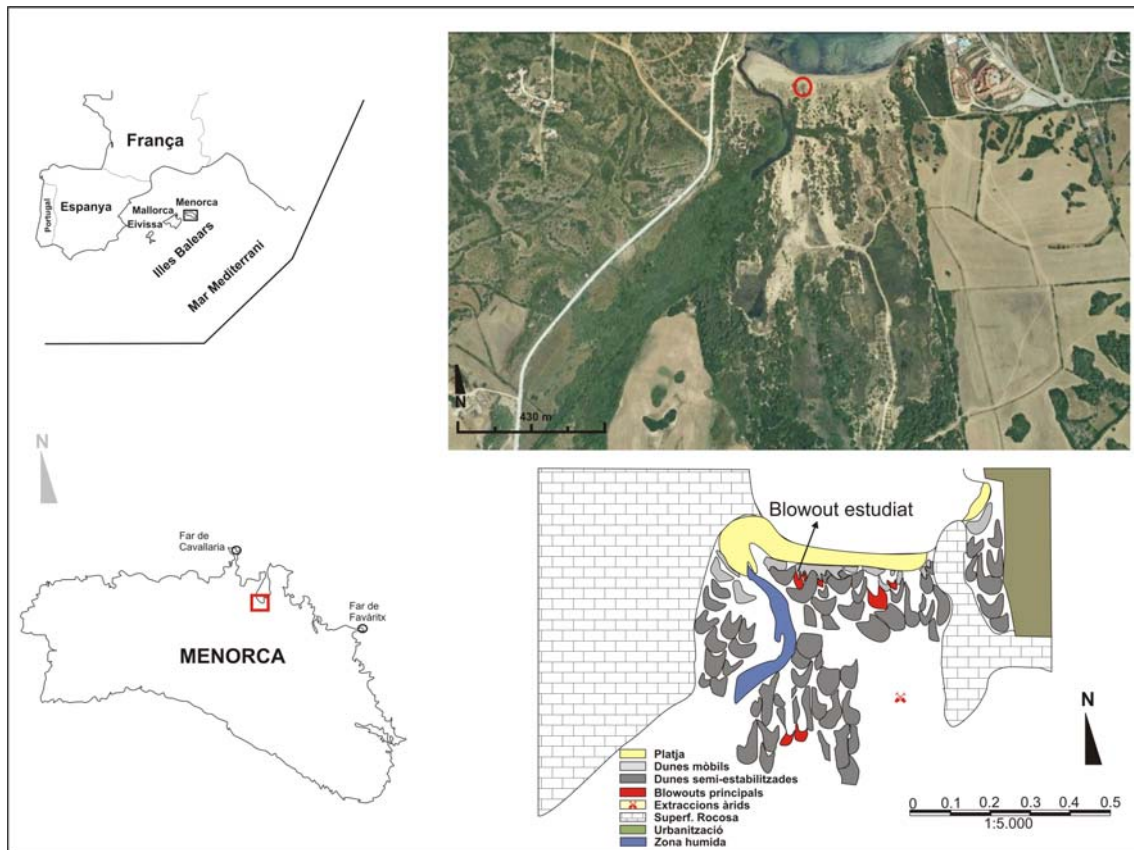
**Taula 55:** Relació entre la quantitat de sediment captada per cada trampa i la direcció mitjana del vent. Les dades es mostren en relació a cada un dels runs, i en tant a la mitjana global. Els anemòmetres de referència són l’anem. 1 (TA), l’anem. 2 (TB) i l’anem. 5 (TC). El run 8 ha quedat eliminat per manca de vent. \* Les dades de transport queden expressades en  $\text{kg m}^{-1} \text{ min}^{-1}$ .



## 4.2. Estudi de cas: Cala Tirant (Menorca)

### 4.2.1. Localització i caracterització física del *blowout*

El *blowout* es localitza al front dunar del sistema platja-duna de Cala Tirant, situat a la costa septentrional de la illa de Menorca (descripció del sistema a l'epígraf 3.2.1.). La morfologia estudiada s'empara dins la primera línia del sistema, en la seva part més mòbil i dinàmica. Dins el context de la platja com a punt de partida, el *blowout* es situa a la seva part occidental, no a molta distància de la desembocadura de la zona humida, i proper a una de les entrades principal a la platja per part dels usuaris (Figura 165).



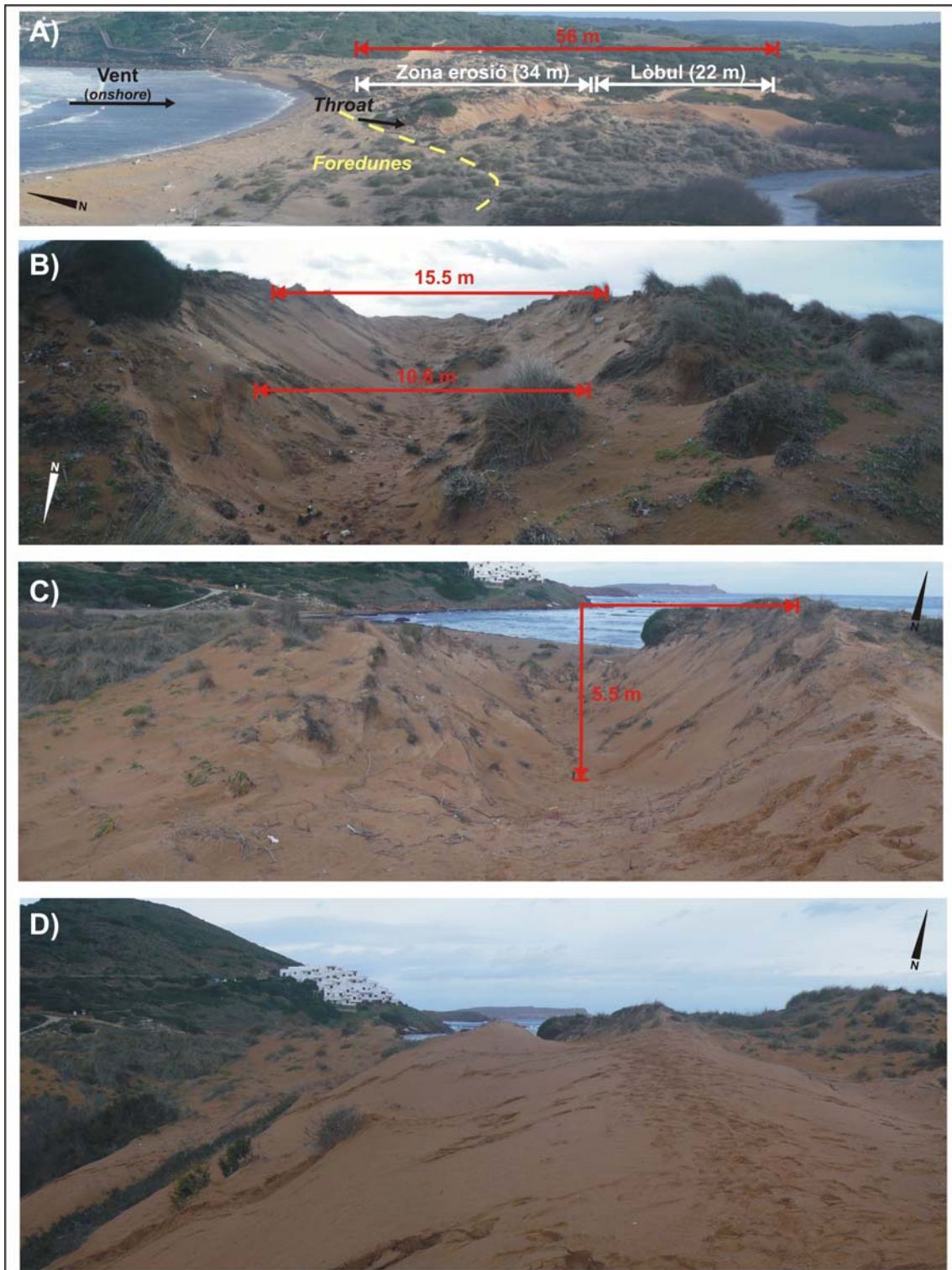
**Figura 165:** Localització geogràfica i context físic del *blowout* analitzat al sistema platja-duna de Cala Tirant (Menorca) A la imatge superior, sobre la fotografia aèria, es localitza geogràficament la morfologia vers al marc del sistema en la seva integritat. D'altra banda, l'esquema geomorfològic a la part inferior de la figura l'emmarca dintre de la franja dominada per dunes mòbils i semi estabilitzades.

Des del punt de vista geomorfològic aquest es troba immers dins la franja dominada per les primeres dunes, aquelles amb característiques altament dinàmiques. Així, forma part de la franja de dunes mòbils i d'aquelles semi estabilitzades per vegetació, principalment herbàcia. Com permet la visualització en fotografia aèria, i

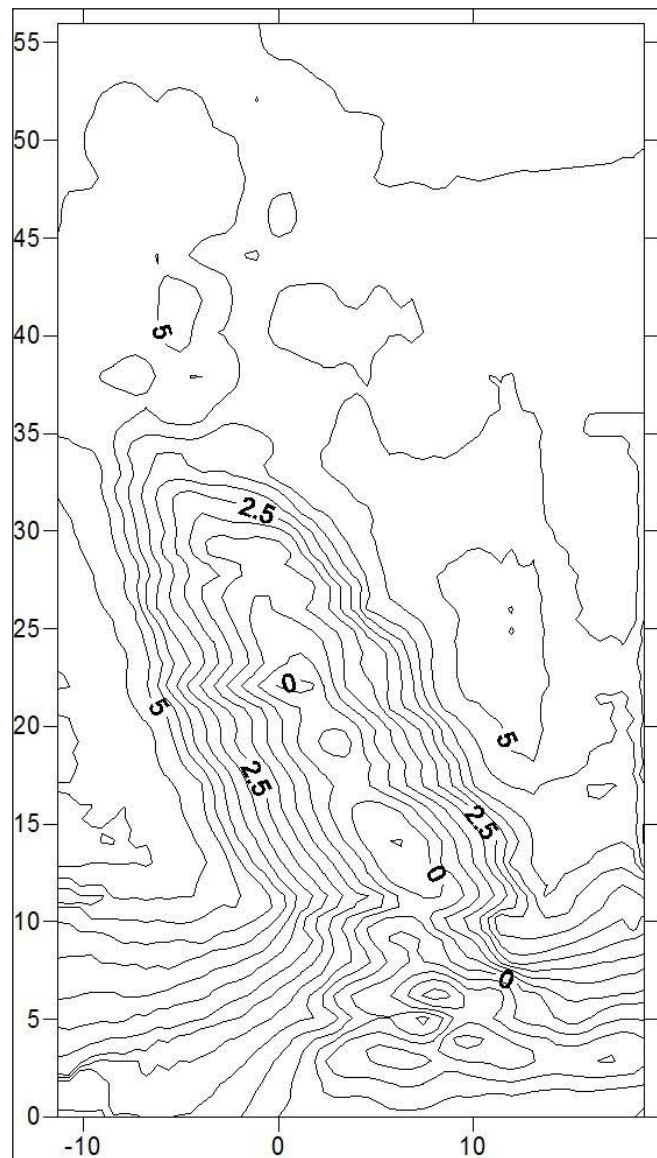
també com mostraran els resultats obtinguts per la present tesi, esdevé una morfologia altament dinàmica des del punt de vista sedimentari, fet que sens dubte suposarà una sinèrgia vers el comportament del sistema dunar en la seva part interior, no sols des del punt de vista geomorfològic, sinó també ecològic.

Pel que fa a la seva caracterització física es tracta d'un *bowl blowout*, seguint la classificació duta a terme per Hesp i Walker (2012) i Smyth et al. (2012). Aquest doncs presenta una forma circular o semi circular, profunda sobretot en la seva part central la qual coincideix amb la plataforma d'erosió. Aquesta es desenvolupa terra endins des de la primera línia, la *foredune*. La part central del *blowout* presenta una profunditat aproximada als 5.5 m respecte al lòbul de deposició, el qual esdevé la part topogràficament més elevada. La seva amplada és variable. Aquesta va des del mínim localitzat a la boca – *throat* –, amb 10.6 m., al màxim situat a la part central, amb 15.5 m. Partint de la seva boca la longitud total del *blowout* es situa en els 56 m, dels quals 34 m formarien la zona d'erosió, mentre que els 22 m conformen el lòbul de deposició situat a la part més interior (Figura 166). Seguint la tendència direccional de la cala en general, i també del desenvolupament integral del sistema dunar, presenta una orientació NNO-SSE (355°) condicionada per la incidència dels vents predominants sobre la primera línia de duna. Un darrer apunt des del punt de vista geomorfològic és que, tal i com apunten Smyth et al. (2012), tot i ser considerat un *bowl blowout* s'ha de tenir en compte la presència d'una bretxa a la seva boca – *throat* – la qual determinarà el comportament del flux eòlic incident en el seu interior.

La línia de *foredune* existent es troba encara avui dia sota signes de degradació i fragmentació. No obstant, les polítiques de gestió i recuperació aplicades a la zona al llarg dels darrers anys permeten veure un increment de morfologies arenoses incipients – *shadow dunes* i *echo dunes* – fixades per vegetació herbàcia, principalment *Ammophila arenaria* (Figura 166A), i amb potències màximes entorn als 1.5 m d'altura. Pel que fa a la vegetació, a l'interior del *blowout* aquesta no hi és notablement present. L'alt dinamisme energètic el qual caracteritza la Tramuntana menorquina fa que siguin sistemes molt dinàmics des del punt de vista sedimentari, fet que dificulta una establiment ferm de vegetació. Aquesta es limita doncs, tal i com s'ha comentat, a la part davantera, principalment dominada per espècies psammòfiles característiques dels sistemes dunars. La zona interior del *blowout* – plataforma de deflació – i el lòbul deposicional es mostren gairebé sense presència d'una cobertura vegetal apreciable (Figura 166C i D).



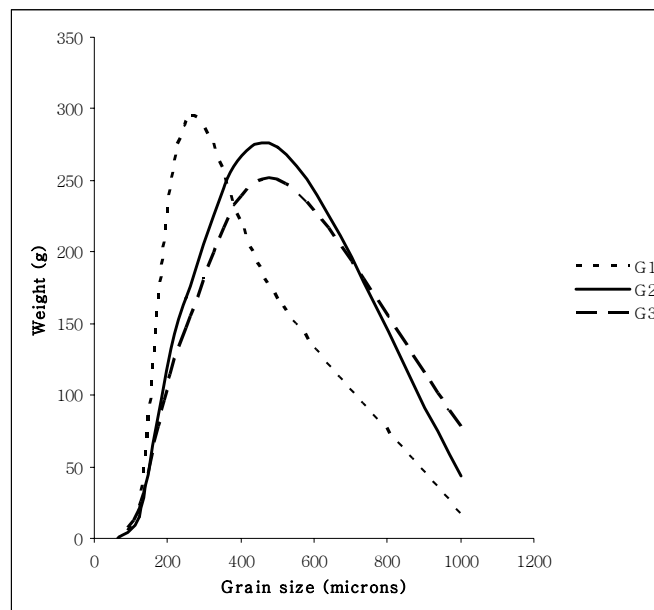
**Figura 166:** Panoràmiques del *blowout* en el sistema de Cala Tirant (Menorca). La figura (A) ofereix una visió integral de la morfologia, integrada dins la primera línia del sistema dunar. S'indiquen també les seves dimensions longitudinals, així com la presència de *foredunes* a la seva part davantera. La figura (B), la qual ofereix una vista de cap al interior, es remarquen les amplades, primer de la seva boca –*throat*–, i després de la seva part central. La figura (C) indica la profunditat màxima, assolida a la part central de la zona d'erosió. Finalment, el darrer (D) mostra una imatge parcial de les dimensions assolides pel lòbul de deposició associat a la seva part més interior.



**Figura 167:** Mapa topogràfic del *blowout* de Cala Tirant.

En aquest cas, i al contrari de la situació presentada pel *blowout* d'es Comú de Muro (veure Figura 156 de l'epígraf 4.1.1.), sembla ser que el *blowout* es troba altament condicionat per les característiques topogràfiques existents. Al *blowout* estudiat es veu que les zones més deprimides es corresponen, a) a la primera línia de dunes – *foredunes* – i, sobretot, b) la cubeta de deflació, amb cotes inferiors als -0 m relatiu (Figura 167). Aquesta segona queda totalment encaixada dintre d'una topografia escarpada, sobretot en les seves parets laterals i també, en la rampa interior, just a la part posterior del *blowout*. Les màximes cotes es localitzen als marges i al lòbul de deposició, situades al voltant dels 5 m d'altura relatiu. Aquest escenari aparenta una influència de la topografia en el comportament del *blowout*, i dels agents, com per exemple el vent, que hi intervenen.

Finalment, el sediment present a la zona, i per extensió a la resta del sistema dunar de Cala Tirant, es conforma per arenes calcàries amb una mida de gra mitjana-gruixada. Existeixen lleugeres diferències entre els diferents punts mostrejats per a la caracterització sedimentària; G<sub>1</sub>, G<sub>2</sub> i G<sub>3</sub> (veure localització dels punts de mostreig a la Figura 47, inferior; epígraf 2.4.3.). En termes generals es percep una suau diferència entre G<sub>1</sub>, amb una major pes d'arenes gruixades ( 58.4%), i G<sub>2</sub> i G<sub>3</sub>, amb valors lleugerament inferiors (54.6% i 50.3% respectivament) (Figura 168). Les mostres a G<sub>1</sub> es conformen d'arenes mitjanes ben ordenades – *well sorted* –, mentre les arenes de G<sub>2</sub> i G<sub>3</sub> es presenten moderadament ben ordenades – *moderately well sorted* – (Taula 56). D'acord a l'aplicació del mètode de Folk i Ward (1957) la mida mitjana de les mostres preses es situa en: G<sub>1</sub>= 380.5μ, G<sub>2</sub>= 472.5μ i G<sub>3</sub>= 484.4μ.



**Figura 168:** Distribució de la mida de gra en cada un dels punts mostrejats a partir de Folk i Ward (1957).

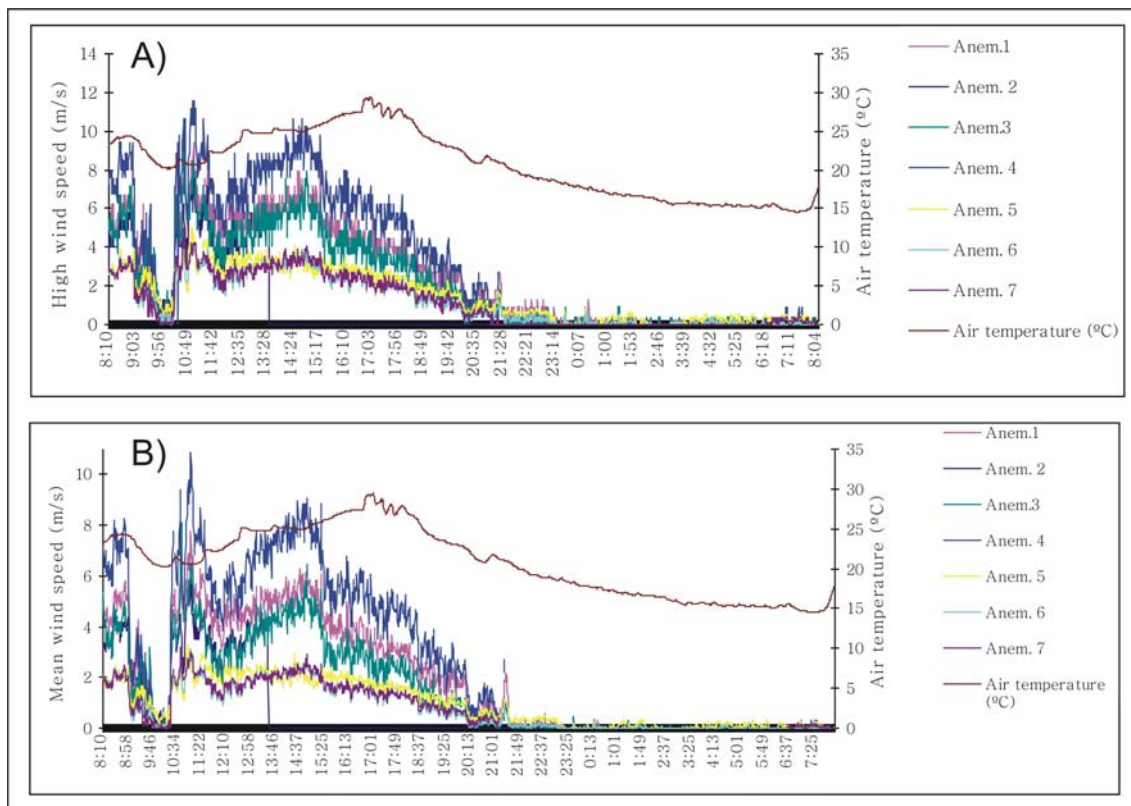
	<b>G1</b>	<b>G2</b>	<b>G3</b>
ANALYST AND DATE:	Miquel Mir, 1/17/2013	Miquel Mir, 1/18/2013	Miquel Mir, 1/19/2013
ERROR:	0,0%	0,0%	0,0%
SAMPLE TYPE:	Bimodal, Moderately Well Sorted	Trimodal, Moderately Well Sorted	Trimodal, Moderately Well Sorted
TEXTURAL GROUP:	Sand	Sand	Sand
SEDIMENT NAME:	Moderately Well Sorted Coarse Sand	Moderately Well Sorted Coarse Sand	Moderately Well Sorted Coarse Sand
FOLK AND WARD METHOD (Description)	Medium Sand	Medium Sand	Medium Sand
	Moderately Well Sorted	Moderately Well Sorted	Moderately Well Sorted
	Very Coarse Skewed	Fine Skewed	Fine Skewed
	Very Platykurtic	Platykurtic	Platykurtic

**Taula 56:** Descripció de les mostres d'arena segons Folk i Ward (1957).

#### 4.2.2. Dinàmica eòlica (situació meteorològica d'estiu)

##### 4.2.2.1. Velocitat del vent. Dades de màximes i mitjanes

La tendència mostrada per les velocitats de vent al llarg de la campanya d'estiu duta terme al sistema de Cala Tirant el 4-5 de setembre de 2012 mostren una certa heterogeneïtat tant si s'analitzen les dades mitjanes com les màximes registrades (Figura 169). Aquestes discrepàncies es mostren en les dues dimensions, l'espacial i la temporal. Les màximes velocitats es registraren al llarg del matí de dia 4, i començaren a disminuir progressivament a partir de les 15:00 h aproximadament – la mateixa tendència es repeteix tant amb les dades mitjanes com en les màximes –. Si es comparen les dades de velocitat amb la tendència mostrada per la temperatura ambient durant l'experiment es pot observar que hi ha una relació força marcada entre ambdues variables. Així la disminució de velocitat del vent sempre es correspon amb una baixada de la temperatura ambient. Aquesta tendència correlacionada s'aprecia sobretot a partir de les 17:00 h, mostrant ambdues una tendència força similar.



**Figura 169:** Velocitat del vent al llarg de les 24 h de mostreig per l'experiment d'estiu a Cala Tirant (Menorca). El primer panell (A) fa referència a la distribució temporal de les velocitats màximes enregistrades per cada anemòmetre, mentre que l'inferior (B) fa el propi amb les velocitats mitjanes.

La Figura 169 també és un bon reflex de les divergències existents entre la intensitat del flux eòlic registrada pels diferents sensors. A primera vista es veu que les velocitats més altes – tant en valors màxims (Figura 169A) com amb valors mitjans (Figura 169B) – foren registrats per l’anem. 4, situat a la rampa interior del *blowout*, mentre que les mínimes es veren als anem. 5 (lòbul de deposició), 6 i 7 (a ambdues parets laterals). Aquestes tendències queden reflectides empíricament per la Taula 57, tot i que amb alguns matisos. Pel que fa a la velocitat mitjana més elevada aquesta fou registrada per l’anem. 4, situat a la rampa interior del *blowout*, amb  $4.4 \text{ ms}^{-1}$ , mentre que la mínima, de sols  $0.5 \text{ ms}^{-1}$  es produí a la part posterior de la *foredune*, a l’anem. 2. Destacar també el valor registrat per l’anem. 7 (situat a la paret lateral oest) amb un valor de  $4.2 \text{ ms}^{-1}$ . La situació no dista molt si es contempen els valors referents a les velocitats màximes. En aquest cas els valors més alts els trobem a l’anem. 5, amb  $3.7 \text{ ms}^{-1}$  (situat al lòbul de deposició) i a l’anem. 4, amb  $3.2 \text{ ms}^{-1}$ . La mínima velocitat màxima, a l’igual que al cas anterior fou registrada per l’anem. 2, sols amb  $0.9 \text{ ms}^{-1}$ .

	Velocitats mitjanes	Velocitats màximes
Anem. 1	1,8	2,5
Anem. 2	0,5	0,9
Anem. 3	1,4	2,1
Anem. 4	4,4	3,2
Anem. 5	2,9	3,7
Anem. 6	2,3	3,0
Anem. 7	4,2	3,0

\* Valors expressats en  $\text{ms}^{-1}$

**Taula 57:** Valors mitjans de les velocitats de vent mitjanes i màximes per a cada anemòmetre al llarg de les 24 h de mostreig. Valors de la situació d’estiu a Cala Tirant (Menorca). En vermell apareixen els valors màxims, i en blau els mínims.

Des d’una perspectiva temporal la màxima velocitat en aquest cas fou registrada per l’anem. 5 – situat al lòbul de deposició – amb un valor de  $12.5 \text{ ms}^{-1}$ , concretament a les 10:56 h. No obstant, aquest valor es presenta puntual i efímer, inclús no sent apreciable a la Figura 169. En termes una mica més abstractes les màximes velocitats foren registrades per l’anem. 4, concretament entre les 10:55-11:05 h, amb una velocitat màxima mitjana de  $11 \text{ ms}^{-1}$ . Tot i que amb diferents intensitats a partir de les 14:00 h es comença a experimentar una disminució de la velocitat en el vent – mitjanes i màximes – arribant a valors nuls de vent (iguals o propers als  $0 \text{ ms}^{-1}$ ) a partir de les 23:00 h.

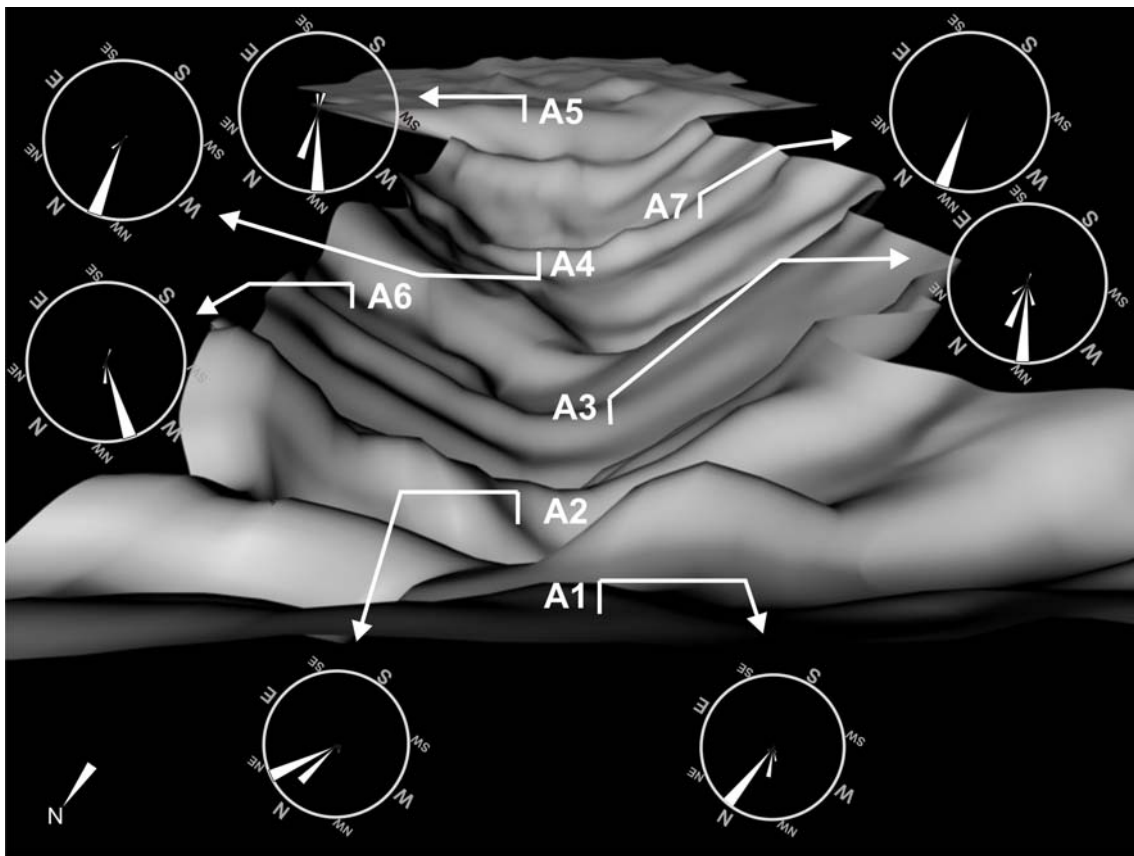
Aquesta tendència s'estendrà al llarg de tot el vespre, coincidint també amb les temperatures més baixes (14-15 °C) (Figura 169).

#### 4.2.2.2. Direcció

Si es pren com a referència l'anem. 1 – el que ens indica les condicions inicials del vent abans d'entrar al *blowout* – la direcció predominant incident dels vents *onshore* al llarg de l'experiment d'estiu a Cala Tirant fou principalment de component N o properes. Al llarg de l'experiment, i degut principalment als canvis de temperatura ambiental, la direcció del vent en el punt inicial (anem. 1) també sofrí certes variacions (com ja s'explicarà amb més profunditat a través de la Figura 171). No obstant, la Figura 170 ens reflecteix canvis notables un cop aquest entre dintre de la morfologia en sí. Pel que fa a l'anem. 2, localitzat a la part posterior de la foredune, queda controlat per vents de component N-NE. Observacions al camp permeteren veure també com la presència d'una major rugositat – vegetació i dunes embrionàries – suposava canvis bruscos en tant a la direcció registrada en aquest punt, possiblement responent a processos de turbulència eòlica, o bé a fluxos secundaris. Seguint, cap fixar-nos de ple amb el comportament que segueixen els anem. 3 – situat just al principi de la plataforma de deflació –, anem. 4 – localitzat a la rampa interior del *blowout* – i anem. 5 – a sobre del lòbul de deposició –. Si s'observa la tendència seguida per cada un dels punts esmentats es pot percebre una certa homogeneïtzació del flux eòlic, manifestat principalment per una component NO-NNO, responent a l'orientació del mateix *blowout*. Aquesta canalització queda principalment manifestada per l'anem. 3 – el qual també, a l'estar situat al principi de la plataforma de deflació enregistra una major diversitat direccional – i, sobretot, per l'anem. 4, que ja a la rampa posterior enregistra el flux totalment canalitzat sota la component NNO. Així doncs arriba el flux a l'anem. 5, que una vegada perd la pressió estàtica de les parets laterals dels *blowouts*, sembla que es diversifica mostrant també altres direccions. I és que aquesta tendència – la mostrada pels anem. 3, 4 i 5 – suggereix pensar fermament amb la incidència i la importància que la topografia té en tant al comportament del flux eòlic dintre de la morfologia en sí. Pel que fa a les parets laterals, presenten comportament força homogenis vers a la direcció del flux eòlic incident, emperò amb alguna diferència entre sí. Pel que fa a la paret est (anem. 6) presenta una direcció predominant de component

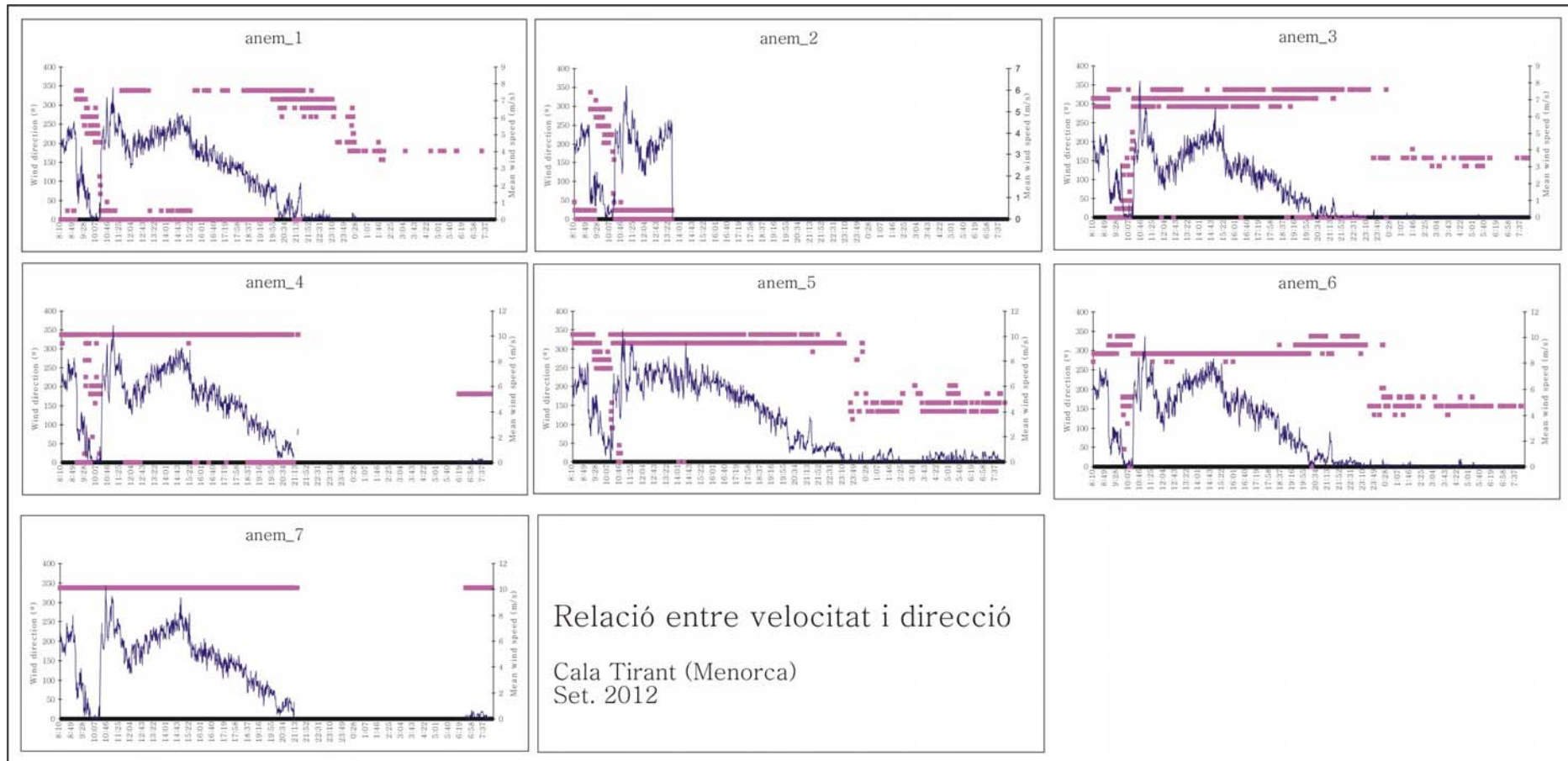


ONO, per tant amb una incidència gairebé perpendicular a l'orientació de la pròpia paret. D'altra banda, en el cas de la paret oest (anem. 7) es presenta una incidència predominant de component NNO, en aquest cas gairebé paral·lela a la orientació de la mateixa. Aquest comportament ens suggereix de nou una relació directe entre el comportament del flux eòlic i la topografia de la morfologia analitzada. Si ens fixem de nou amb la Figura 170 veiem com l'orientació del *blowout* fa que la paret est (anem. 6) quedi un tant arrecerada dels vents purs de component N, tenint doncs predominança d'una orientació més oberta cap a l'O. El contrari succeeix en el cas de la paret oest (anem. 7), que més oberta a l'orientació del *blowout* és més susceptible de rebre la incidència de vents de N, en aquest cas sent gairebé paral·lels a la orientació, com s'ha esmentat, de la pròpia paret.



**Figura 170:** Roses de direccions del vent al llarg de les 24 h de mostreig per a cada un dels 7 sensors desplegats. Experiment d'estiu a Cala Tirant (Menorca).

Si bé la Figura 170 ens dona una visió generalista del comportament direccional del vent un cop dintre de la morfologia *blowout*, aquest sofrí variacions a considerar des del punt de vista temporal i espacial (Figura 171).



**Figura 171:** Relació existent – en escala temporal – entre la velocitat i la direcció enregistrada per cada un dels anemòmetres utilitzats. Experiment d'estiu a Cala Tirant (Menorca). \* Per problemes tècnics l'anemòmetre 2 només mostra dades reals fins a les 13:00 h.

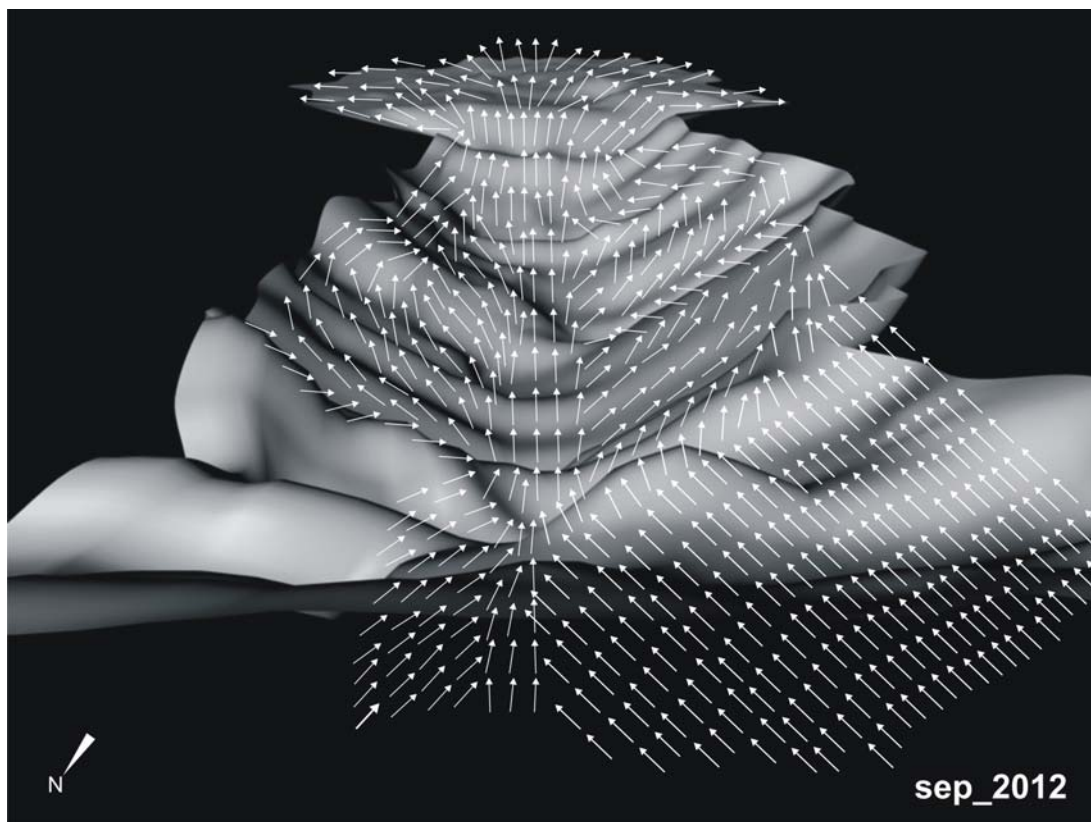
Al llarg de dia 4 – entenent-ho com al llarg de les hores de Sol –, des de l'inici de l'experiment (08:10 h) fins a les 22:00 h aproximadament, la tendència mostrada per cada un dels anemòmetres és força similar, enregistrant direccions de vent que es situen dins el quadrant NO, oscil·lant entre els 200°-350°. Tot i aquesta pauta més generalista, hi caben també alguns comentaris més puntuals. Si es posa esment a la velocitat del vent enregistrada per a cada sensor entre, aproximadament les 09:30-10:30 h, es veu un canvi generalitzat de la direcció incident, ara fixada dins el quadrant NE, amb valors oscil·lant, en termes generals, entre els 0°-100° (Figura 171). No obstant, després d'aquest període de baixada sobtada de la força del vent, les velocitats s'incrementen de nou tornant a dur associades direccions predominants de NO. Si es compara aquest període amb la Figura 169A i B es veu que coincideix amb una baixada de la temperatura ambient. En aquest sentit es mostra una relació entre les condicions meteorològiques – temperatura –, velocitat del vent i direcció, tenint com a resultat que els vents més forts es donaren sota condicions de temperatures més elevades i sota un component de NO.

De nou, aquesta relació a tres bandes queda de manifest en el que ens mostra la Figura 171, sense excepció, en cada un dels sensors. Així, a partir de les 22:00 h es dona una baixada notable vers a les velocitats de vent enregistrades, que de nou es corresponen amb una baixada important de la temperatura ambiental, i que, com es comentava en el període puntual viscut al llarg del matí de dia 4, predomina la component NO.

#### 4.2.2.3. Flux eòlic intern

L'aproximació extrapolada del flux eòlic incident dins del *blowout* al llarg de l'experiment a Cala Tirant sota condicions energètiques baixes queda representat per la Figura 172. Les condicions inicials registrades per l'anem. 1 (veure rosa de direccions a la Figura 170) indiquen vents *onshore* de component N-NNO. L'increment de la rugositat en primera línia a conseqüència de la vegetació herbàcia existent i la presència de morfologies arenoses embrionàries suposa una major alteració d'aquest, fent-ne més difícil establir una tendència clara. Un cop el flux arriba a la boca del *blowout* – *throat* –, entre els anem. 2 i 3, experimenta una notable canalització la qual el fa molt més homogeni, sobretot arran de la canal de deflació i, també, de la rampa interior (anem. 4).

No obstant, aquesta canalització desapareix un cop el flux arriba a la part superior del *blowout*, just a l'inici del lòbul de deposició, a on sofreix una important divergència. Aquest escenari, caracteritzat per una canalització a la part interior del *blowout* i una divergència al lòbul de deposició fa pensar amb la importància condicionant derivada del paper que la topografia en aquest cas té vers al comportament eòlic dintre de la pròpia morfologia, i també al seu voltant. La pressió estàtica d'aquesta suposa un compressió del flux, responent al que expliquen els principis de Bernoulli i Venturi. Així, un cop el flux perd aquesta pressió s'expandeix i es diversifica (Figura 172).



**Figura 172:** Modelització extrapolada del flux intern dintre de la morfologia *blowout*. Experiment d'estiu a Cala Tirant (Menorca).

El comportament del flux vers a les parets laterals és un tant més heterogeni, emperò seguint pautes similars en ambdós casos (Figura 172). Amb una incidència del vent un tant obliqua la descompressió del flux es dona de cap a la part posterior, incrementant en ambdós casos la canalització d'aquest a la part central i, d'altra banda, la divergència un cop arribat a la part posterior, ja sense la pressió estàtica de la topografia.

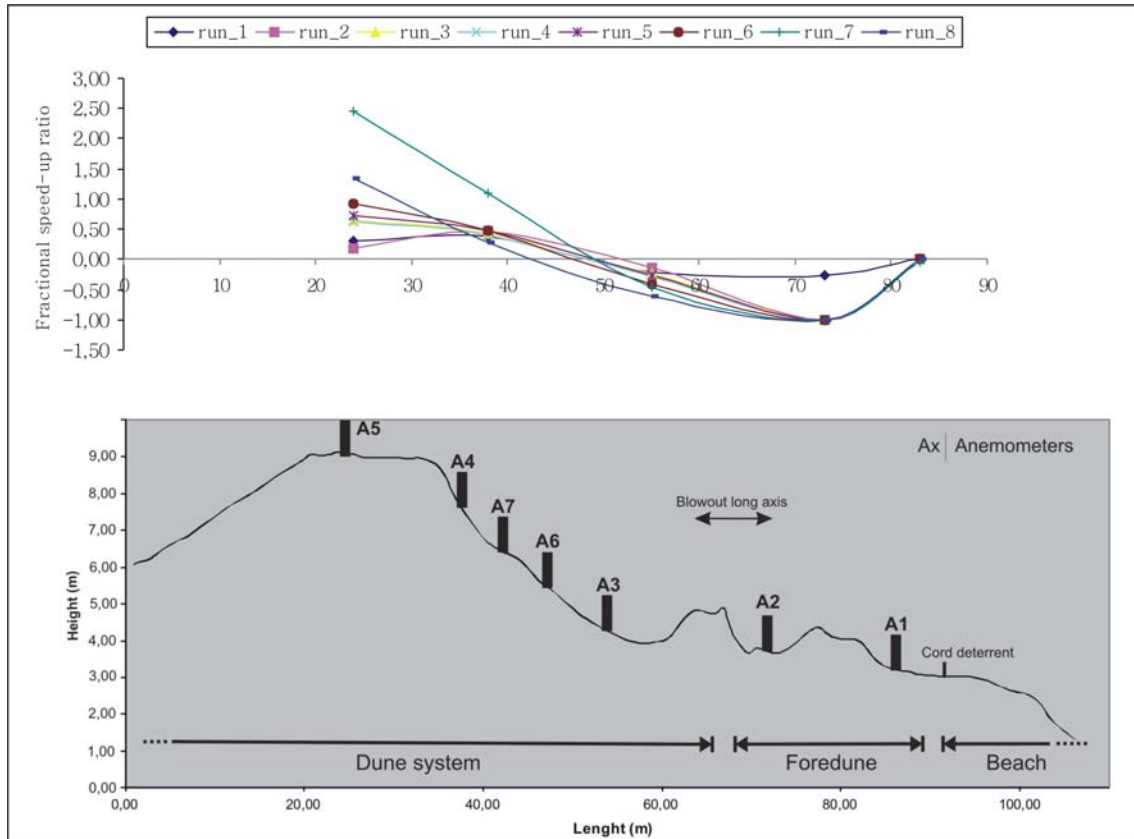
4.2.2.4. Variabilitat d'intensitat a partir de la variable altura; *Fractional Speed-up ratio*

Com ja s'ha mencionat, l'efecte de la topografia vers el comportament del flux eòlic dintre de les morfologies *blowout* és una variable pilar a ser considerada. No obstant, d'altres variables associades també ens ajuden a comprendre millor la distribució del vent al llarg de la pròpia morfologia. Un exemple n'és, entre altres, la variable altura. L'aplicació de l'índex *fractional speed-up ratio*, ja aplicat per alguns autors tals com Hugenholtz i Wolfe (2009), ens permet veure les variacions de la força incident del vent a través d'un perfil longitudinal tenint en consideració la variable *altura* estandarditzada en cada un dels sensors a partir de l'anem. 1 com a referència (veure'l explicat a l'epígraf 2.4.4.2.).

En el cas de l'experiment sota condicions de calma energètica (estiu) s'aplica el *fractional speed-up ratio* al llarg de 8 moments de mostreig – *runs* –, cada un d'ells amb una durada de 20 min (Taula 58 i Figura 173). En una primera aproximació ja es percep com les característiques topogràfiques existents al llarg de la morfologia analitzada suposen variacions important vers a la distribució de la velocitat del vent incident. D'aquesta manera la Figura 173 reflecteix les variacions que aquest sofreix al llarg del seu recorregut dintre del *blowout*. Partint de les condicions inicials reflectides per l'anem. 1 – anemòmetre de referència – el qual presenta una valor de  $\delta s = 0$ , es veu una reducció notable a l'anem. 2, situat just a la part posterior de la línia de *foredune*, presentant el valor mitjà més baix de la mostra amb  $\delta s \chi = -0.91$ . A partir d'aquest moment la velocitat del vent un cop arriba a l'interior de la morfologia no atura d'incrementar-se. L'anem. 3, localitzat de ple a la cubeta de deflació expressa un valor mitjà de  $\delta s \chi = -0.33$ , el qual es veurà encara incrementat a la rampa interior del *blowout* (anem. 4) amb  $\delta s \chi = 0.50$ , assolint el seu màxim al lòbul de deposició (anem. 5), amb  $\delta s \chi = 0.90$ . En termes de variabilitat, la màxima es localitza a l'anem. 5 (lòbul de deposició), amb una oscil·lació de  $\delta s = 0.19/0.92$ , mentre que la mínima es percep a l'anem. 2 (darrera *foredune*);  $\delta s = -0.27/-1.00$ , i a l'anem. 3 (cubeta de deflació);  $\delta s = -0.13/-0.60$ . Si en considerem la desviació estàndard el màxim valor coincideix amb el punt de màxima variabilitat, l'anem. 5 amb un valor de  $\delta s \sigma = 0.72$ , i la mínima es registra a l'anem. 3, amb  $\delta s \sigma = 0.15$ . Finalment, el valor de màxima velocitat – estandarditzada – és de  $\delta s = 2.45$ , registrat a l'anem. 5 al llarg del *run 7*. Les mínimes es repeteixen a l'anem. 2, amb valors de  $\delta s = -1.00$  (Taula 58 i Figura 173).

	RUN_1 (08:43-09:03)		RUN_2 (13:59-14:19)		RUN_3 (16:04-16:24)		RUN_4 (17:05-17:25)		RUN_5 (18:04-18:24)		RUN_6 (19:04-19:24)		RUN_7 (20:05-20:25)		RUN_8 (21:04-21:24)		$\delta s \chi$	$\delta s \sigma$	
	Lenght	$u_z$	Ratio	$u_z$	Ratio	$u_z$	Ratio	$u_z$	Ratio	$u_z$	Ratio	$u_z$	Ratio	$u_z$	Ratio	$u_z$	Ratio		
Anem. 1	83	4,8	0,00	5,3	0,00	3,8	0,00	3,2	-0,01	2,8	0,00	1,8	0,01	0,4	-0,04	0,9	0,02	0,00	0,01
Anem. 2	73	3,5	-0,27	0,0	-1,00	0,0	-1,00	0,0	-1,00	0,0	-1,00	0,0	-1,00	0,0	-1,00	0,0	-1,00	-0,91	0,26
Anem. 3	55	3,8	-0,21	4,6	-0,13	2,9	-0,24	2,3	-0,30	2,0	-0,27	1,1	-0,41	0,2	-0,46	0,4	-0,60	-0,33	0,15
Anem. 4	38	6,6	0,38	7,7	0,45	5,4	0,42	4,5	0,40	4,2	0,49	2,6	0,47	0,8	1,11	1,2	0,29	0,50	0,25
Anem. 5	24	6,3	0,31	6,3	0,19	6,3	0,66	5,2	0,63	4,8	0,73	3,5	0,92	1,4	2,45	2,1	1,33	0,90	0,72
Anem. 6	47	6,1	0,27	6,9	0,30	4,8	0,26	3,9	0,23	3,7	0,34	2,1	0,19	0,4	0,07	1,1	0,19	0,23	0,08
Anem. 7	42	6,0	0,25	7,0	0,32	5,0	0,32	4,1	0,28	3,8	0,37	2,4	0,35	0,7	0,86	0,7	-0,19	0,32	0,28
$\delta s \chi$			0,10		0,02		0,06		0,03		0,09		0,07		0,43		0,01		
$\delta s \sigma$			3,27		0,49		0,55		0,54		0,58		0,63		1,15		0,74		
Anem. 1 (ref)		4,8		5,3		3,8		3,2		2,8		1,8		0,4		0,9			

**Taula 58:** Velocitat mitjana del vent per cada un dels anemòmetres despleats ( $u_z$ ) i els seus respectius valors estandarditzats de l'aplicació del *fractional speed-up ratio* ( $\delta s$ ) calculats a partir de 8 moments de mostreig – *runs* – de 20 min de durada. Addicionalment es presenta la mitjana ( $\delta s \chi$ ) i la desviació estàndard ( $\delta s \sigma$ ) per a cada sensor i per a cada moment de mostreig. Experiment d'estiu a Cala Tirant.



**Figura 173:** *Fractional speed-up ratio* dintre de la morfologia *blowout* de Cala Tirant en l'experiment d'estiu. Els perfils longitudinals estan fets a partir dels anem. 1, 2, 3, 4 i 5, prenent com a referència l'anem. 1. Els anem. 6 i 7 no s'inclouen a la gràfica ja que no estaven disposats en el mateix transecte longitudinal.

Si s'analitza l'aplicació d'aquest índex des de la perspectiva temporal es pot observar com el màxim valor es localitza al *run* 7, amb  $\delta s \chi = 0.43$ , mentre que la mínima queda reflectida als *run* 8 ( $\delta s \chi = 0.01$ ), *run* 2 ( $\delta s \chi = 0.02$ ) i *run* 3 ( $\delta s \chi = 0.03$ ) (Taula 58).

#### 4.2.3. Dinàmica eòlica (situació meteorològica d'hivern)

##### 4.2.3.1. Velocitat del vent. Dades de màximes i mitjanes

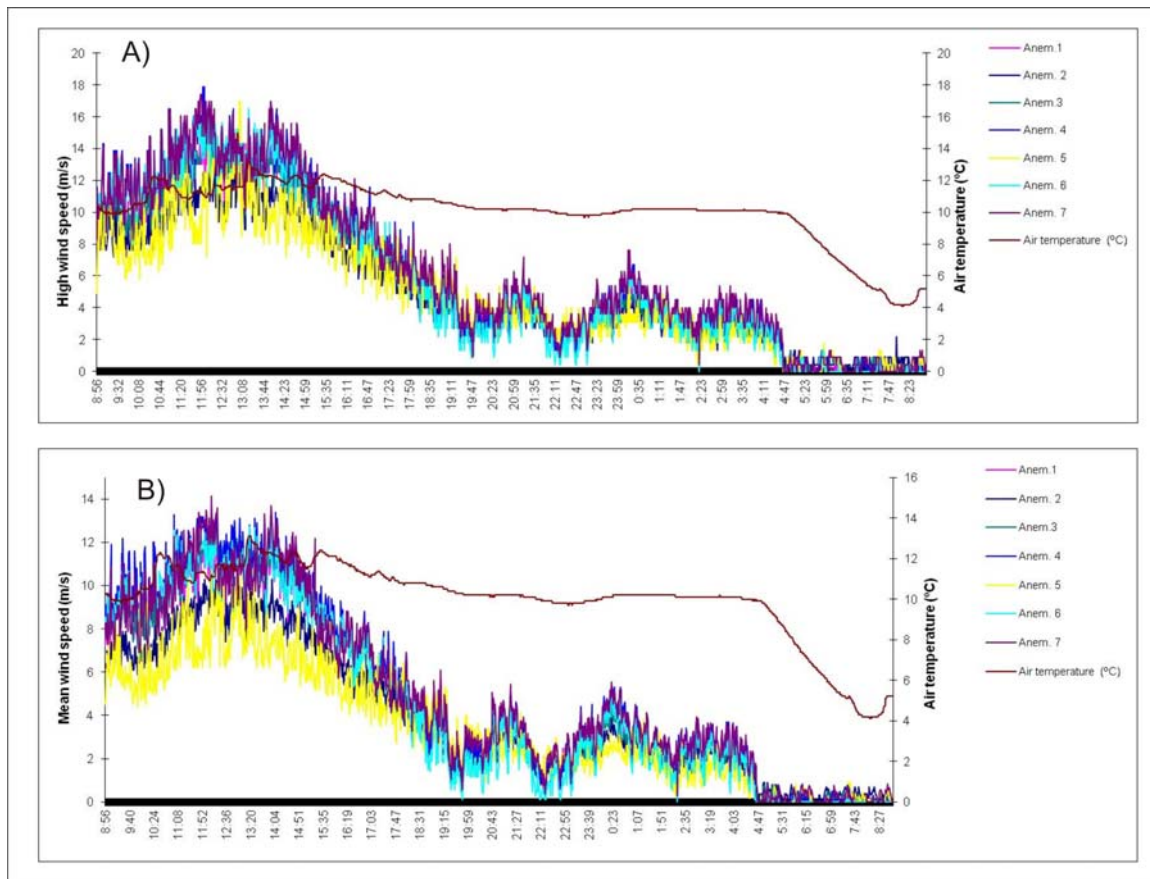
Les velocitats del vent registrades al llarg de l'experiment d'hivern, comprès entre el 17 i 18 de gener de 2013, es mostren variables tant en temps com en espai (Figura 174). Les màximes velocitats – tant si s'analitzen les velocitats mitjanes com les màximes – es registraren al llarg del matí de dia 17, coincidint alhora amb el període en que la temperatura ambient fou més elevada. En aquest sentit, també es percep una clara

correlació entre la disminució de la velocitat del vent i la disminució de la temperatura ambiental, principalment a partir de les 05:00 – ja de dia 18 –.

	Velocitat mitjanes	Velocitats màximes
Anem. 1	4,6	5,7
Anem. 2	3,9	4,9
Anem. 3	4,7	5,5
Anem. 4	5,0	6,1
Anem. 5	3,8	5,0
Anem. 6	4,8	5,8
Anem. 7	5,4	6,4

\* Valors expressats en  $\text{ms}^{-1}$

**Taula 59:** Valors mitjans de les velocitats de vent mitjanes i màximes per a cada anemòmetre al llarg de les 24 h de mostreig. Valors de la situació d'hivern a Cala Tirant (Menorca). En vermell apareixen els valors màxims, i en blau els mínims.



**Figura 174:** Velocitat del vent al llarg de les 24 h de mostreig per l'experiment d'hivern a Cala Tirant (Menorca). La figura (A) fa referència a la distribució temporal de les velocitats màximes enregistrades per cada anemòmetre, mentre que la figura (B) fa el propi amb les velocitats mitjanes (Mir-Gual et al., en revisió).



Des del punt de vista espacial els vents més forts – tant en valors mitjans com màxims – es donaren a la rampa interior del *blowout* (anem. 4) i a les parets laterals (anem. 6 i 7). Contràriament les velocitats més baixes succeïren just a la part posterior de la *foredune* (anem. 2) i al principi del lòbul de deposició, topogràficament la zona més elevada de la morfologia (anem. 5). En termes generals els anemòmetres que experimentaren els valors mitjans més elevats foren els anem. 7 (mitjanes=  $5.4 \text{ ms}^{-1}$ ; màximes =  $6.4 \text{ ms}^{-1}$ ) i l'anem. 4 (mitjanes=  $5.0 \text{ ms}^{-1}$ ; màximes =  $6.1 \text{ ms}^{-1}$ ). D'altra banda els valors mínims foren registrats pels anem. 5 (mitjanes=  $3.8 \text{ ms}^{-1}$ ; màximes =  $5.0 \text{ ms}^{-1}$ ) i per l'anem. 2 (mitjanes=  $3.9 \text{ ms}^{-1}$ ; màximes =  $4.9 \text{ ms}^{-1}$ ). Finalment els anem. 1, 3 i 6 mostren valors entremig que es situen en  $4.6 \text{ ms}^{-1}$ ,  $4.7 \text{ ms}^{-1}$ , i  $4.8 \text{ ms}^{-1}$  respecte a les velocitats mitjanes, i  $5.7 \text{ ms}^{-1}$ ,  $5.5 \text{ ms}^{-1}$ , i  $5.8 \text{ ms}^{-1}$  respecte a les màximes (Taula 59).

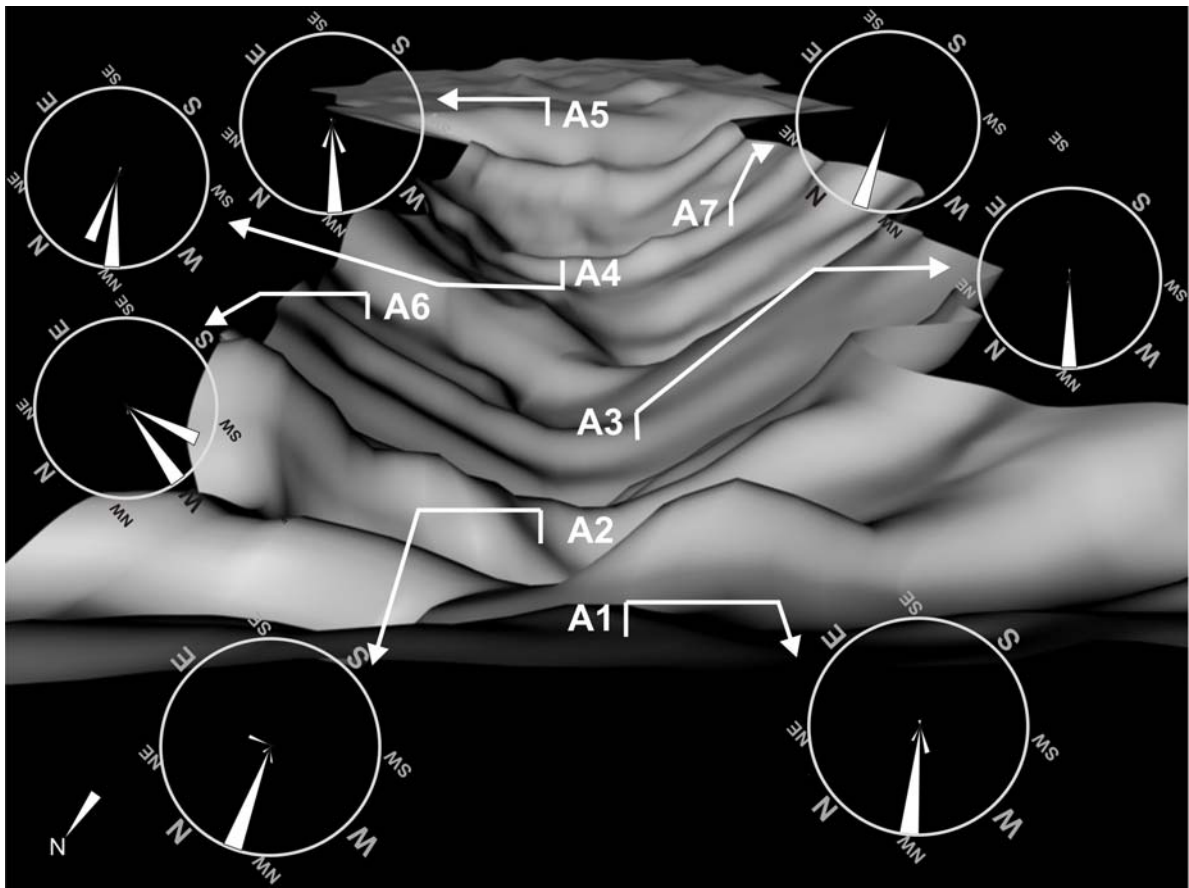
Temporalment, la màxima velocitat registrada es fixà amb  $17.9 \text{ ms}^{-1}$ , concretament a les 12:02 h per l'anem. 4 – situat a la rampa interior del *blowout* –. En termes generals, les velocitats del vent van començar a minvar progressivament a partir de les 14:00 h, arribant als valors mínims (propers als  $0 \text{ ms}^{-1}$ ) entre les 04:30-08:56 h del dia 18 (Figura 174). El comportament i la tendència seguida al llarg de la campanya fou força similar entre els distints anemòmetres disposats, tots indicant de manera unànime una baixada de velocitats generalitzades a partir de les 14:00 h de dia 17, fins arribar a vents gairebé inexistents des de les 05:00 h de dia 18.

#### 4.2.3.2. Direcció

A l'igual que en la situació descrita sota condicions de calma energètica (epígraf 4.2.2.2.) sembla ser que les condicions topogràfiques tenen incidència en tant a la direccionalitat del vent, sobretot, dintre de la morfologia *blowout* estudiada. La Figura 175 ens mostra les direccions obtingudes en cada un dels sensors despleats.

En aquest cas la direcció predominant a l'anem. 1 – prenent-ho com a sensor de referència vers l'input de vent dintre del *blowout* – és clarament de NO, emperò mostrant també algunes lleugeres desviacions cap al ONO i NNO. A continuació, l'anem. 2, situat a la part posterior de la *foredune* i amb presència de vegetació herbàcia als seus voltants (principalment *Ammophila arenaria*), registra una direcció del flux predominant de NNO, amb fluxos secundaris de N i NE. En termes de divergència, si es comparen amb els altres sensors, aquest és el punt que major grau mostra, no tant en grau d'importància de les distintes direccions registrades, sinó en tant a la seva

diversitat. Una de les situacions amb les que cal fixar-se ocorre dintre de la morfologia en sí, concretament al llarg del canal de deflació i la rampa interior, amb la tendència marcada pels anem. 3 i 4. Pel que fa al primer cas es veu una predominança absoluta del flux amb component NO, indicant una clara canalització d'aquest condicionada per la pressió estàtica de la topografia existent – en aquest cas les parets laterals del *blowout* –. Aquesta tendència s'estén clarament fins a la rampa interior, a on s'hi localitza l'anem. 4, el qual mostra també una clara predominança del flux sota la mateixa component, NO. No obstant, en aquest cas també es registra una certa importància de la component NNO, responent al reagrupament del flux provinent de la fricció amb la paret lateral est del *blowout*.

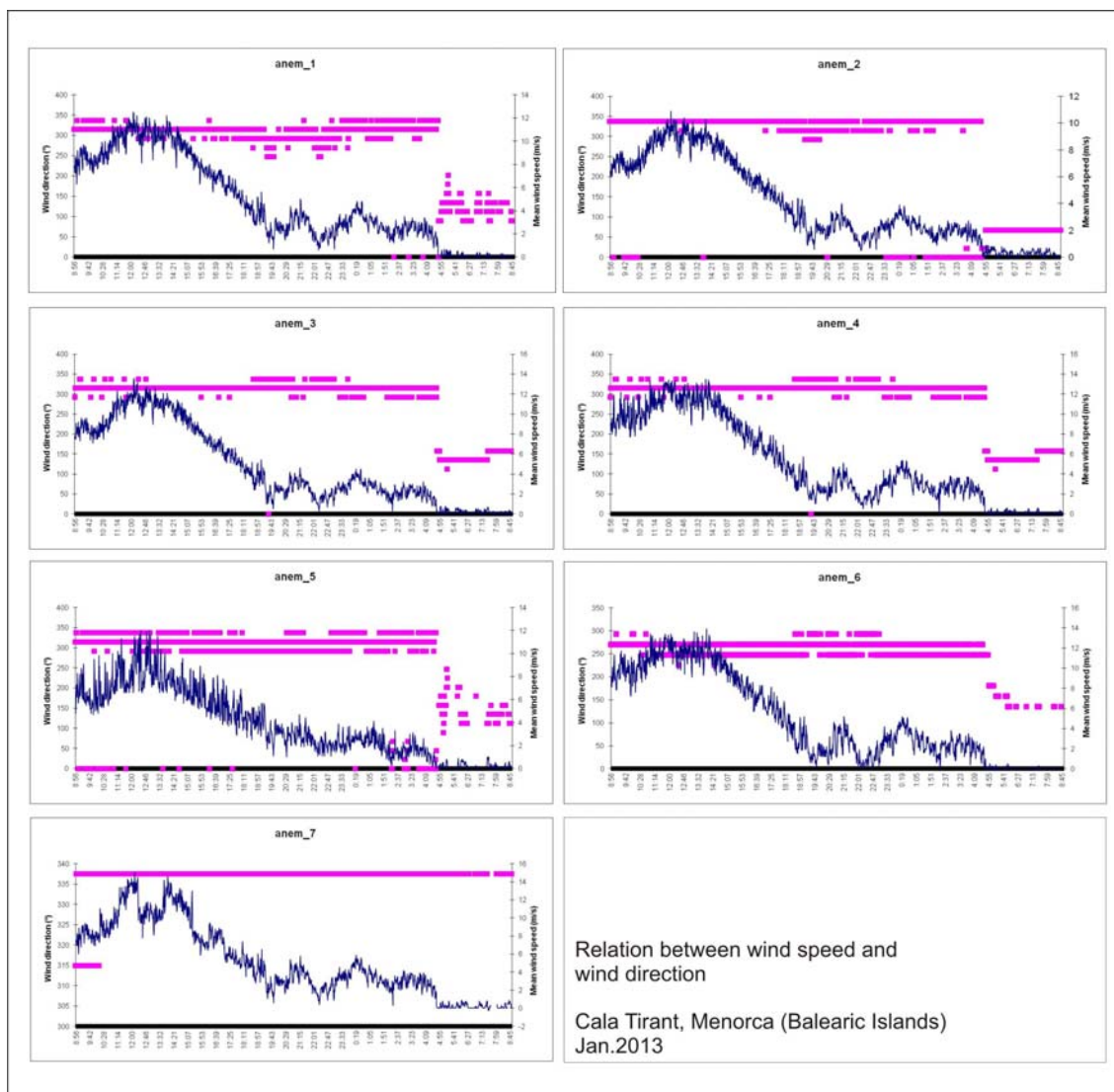


**Figura 175:** Roses de direccions del vent al llarg de les 24 h de mostreig per a cada un dels 7 sensors desplegats. Experiment d'hivern a Cala Tirant (Menorca) (Mir-Gual et al., en revisió).

Aquest darrer comportament s'incrementa ja a l'inici del lòbul de deposició, registrat per l'anem. 5. En aquest cas el flux predominant, seguint la tendència iniciada a la cubeta de deflació, és també de component NO, donant si cal, més suport al procés de canalització existent. No obstant, es perceben fluxos secundaris de NNO i ONO,

ambdós indicant el reagrupament del flux ara provinent d'ambdues parets laterals. El comportament indicat per la direccionalitat registrada en els anemòmetres 3, 4 i 5 convida clarament a verificar la influència de la topografia vers el comportament del flux dintre de la morfologia *blowout*. En aquest cas, amb una topografia escarpada vers el pendent de les dues parets laterals, el flux queda controlat pel que explica el principi de Bernoulli o l'efecte Venturi. El que ens indiquen ambdues teories és la canalització – i increment de velocitat – del flux quan aquest es veu controlat per la pressió estàtica d'algun element sòlid, en aquest cas la topografia.

Finalment, fer esment especial al que succeeix a les parets laterals. En primer lloc, la paret lateral oest és la que registra el flux més homogeni (anem. 7), dominat notablement per la component NNO, i el qual es mostra gairebé paral·lel a l'orientació seguida per la pròpia paret. Una situació distinta es dona en el cas de la paret est (anem. 6) – ambdues separades per manco de 5 m –. En aquest cas el flux incident predominant és de component O, i amb menor mesura OSO. Sigui com sigui ambdues direccions es mostren gairebé perpendiculars a l'orientació de la paret. Aquest fet tindrà conseqüències notables en tant als patrons de transport sedimentari seguits a l'interior del *blowout* – com es veurà amb més detall a l'epígraf 4.2.5. –. Com a primera aproximació la incidència recurrent del flux perpendicular a la paret est, sobretot al llarg de les hores de major intensitat eòlica (09:00-14:00 h), suposarà gran nombre d'esllavissades d'arena que per gravetat dipositaran sobre la canal de deflació, al temps que modificaran la topografia interna del *blowout*. Al contrari, en el cas de la paret oest, la incidència paral·lela del flux derivarà en una erosió laminar.



**Figura 176:** Relació existent – en escala temporal – entre la velocitat i la direcció enregistrada per cada un dels anemòmetres utilitzats. Experiment d’hivern a Cala Tirant (Menorca) (Mir-Gual et al., en revisió).

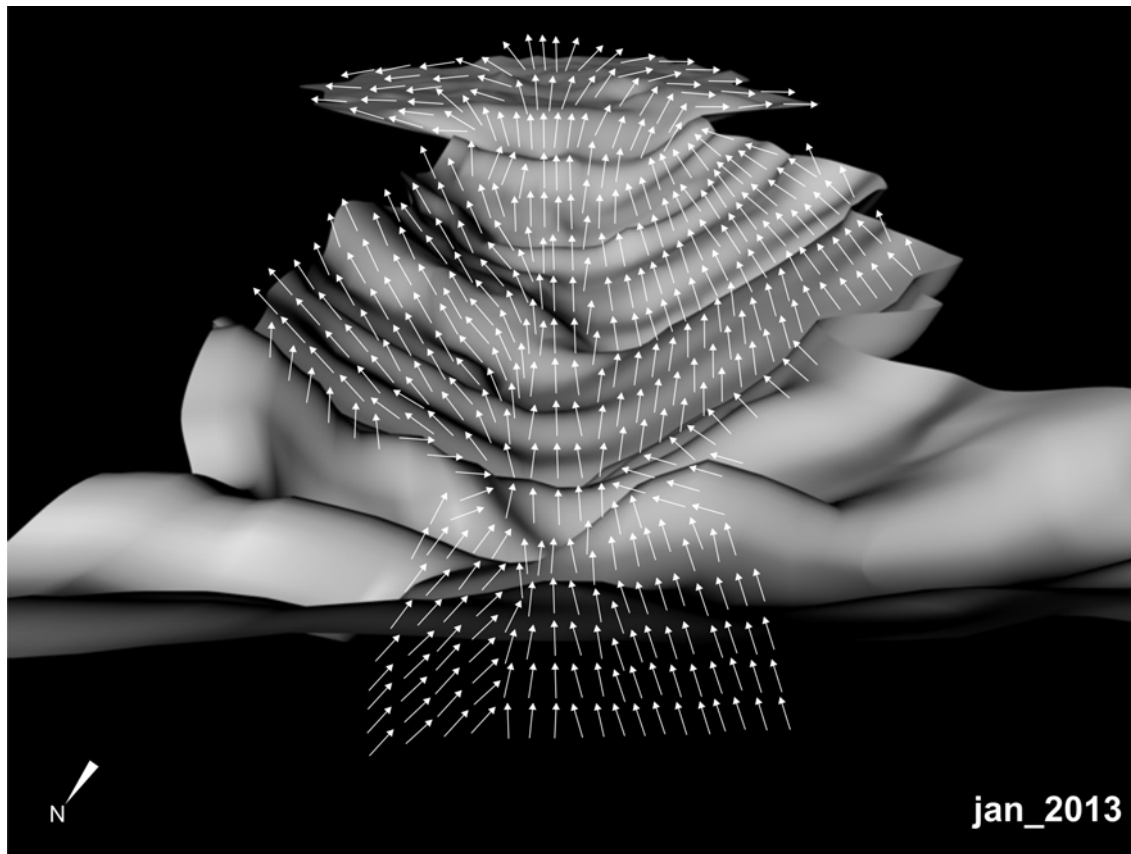
Pel que fa a la direcció enregistrada individualment per a cada un dels anemòmetres, la tendència es mostra lleugerament més homogènia que en el cas anterior – situació d’estiu –. No obstant, cal apuntar-ne algunes consideracions, reflectides gràficament per la Figura 176. En termes generals la tendència seguida és notablement homogènia des de l’inici de l’experiment (08:56 h del dia 17) fins aproximadament les 04:00 h (dia 18), amb direccions de vent *onshore* que es mouen entre els 300°-350° (aproximades al quadrant NNO-ONO). Dintre d’aquesta línia, el que més alteracions direccionals presenta és l’anem. 1, sobretot entre les 19:00-23:30 h, amb direccions que es mouen entorn als 250° (pròximes a la component O), i que es corresponen a una baixada en la força del vent incident. Una tendència de variació similar es pot apreciar d’igual manera a l’anem. 5. D’aquesta manera doncs, si es fa una

visió general, els punts d'*input* (anem. 1) i *output* (anem. 5) de vent són els que major variabilitat direccional mostren. Si bé la tendència registrada es mostra homogènia al llarg de bona part de l'experiment, la situació canvia notablement, i també de forma generalitzada, des de les 04:00 h fins al final. Tal i com reflecteix la Figura 174A i B, i també per cada cas la Figura 176, és a partir d'aquesta hora quan la velocitat del vent cau en picat, gairebé sense exercir influència energètica. Així doncs, corresponent-se a dita baixada, les direccions de vent canvien substancialment, ara oscil·lant, si s'observa amb perspectiva generalista, entre els 135°- 225°, sobretot en els anem. 1 i 5. Així, la baixada de la velocitat del vent en aquest cas suposa un canvi en la direcció, ara de component S, i que ens indica vents *offshore* (terral). Al binomi baixada de velocitat – canvi de direcció es pot afegir la variable atmosfèrica, ja que com es mostra a la Figura 174A i B, la baixada de la velocitat del vent es correspon amb una disminució significativa de la temperatura atmosfèrica registrada.

#### 4.2.3.3. Flux eòlic intern

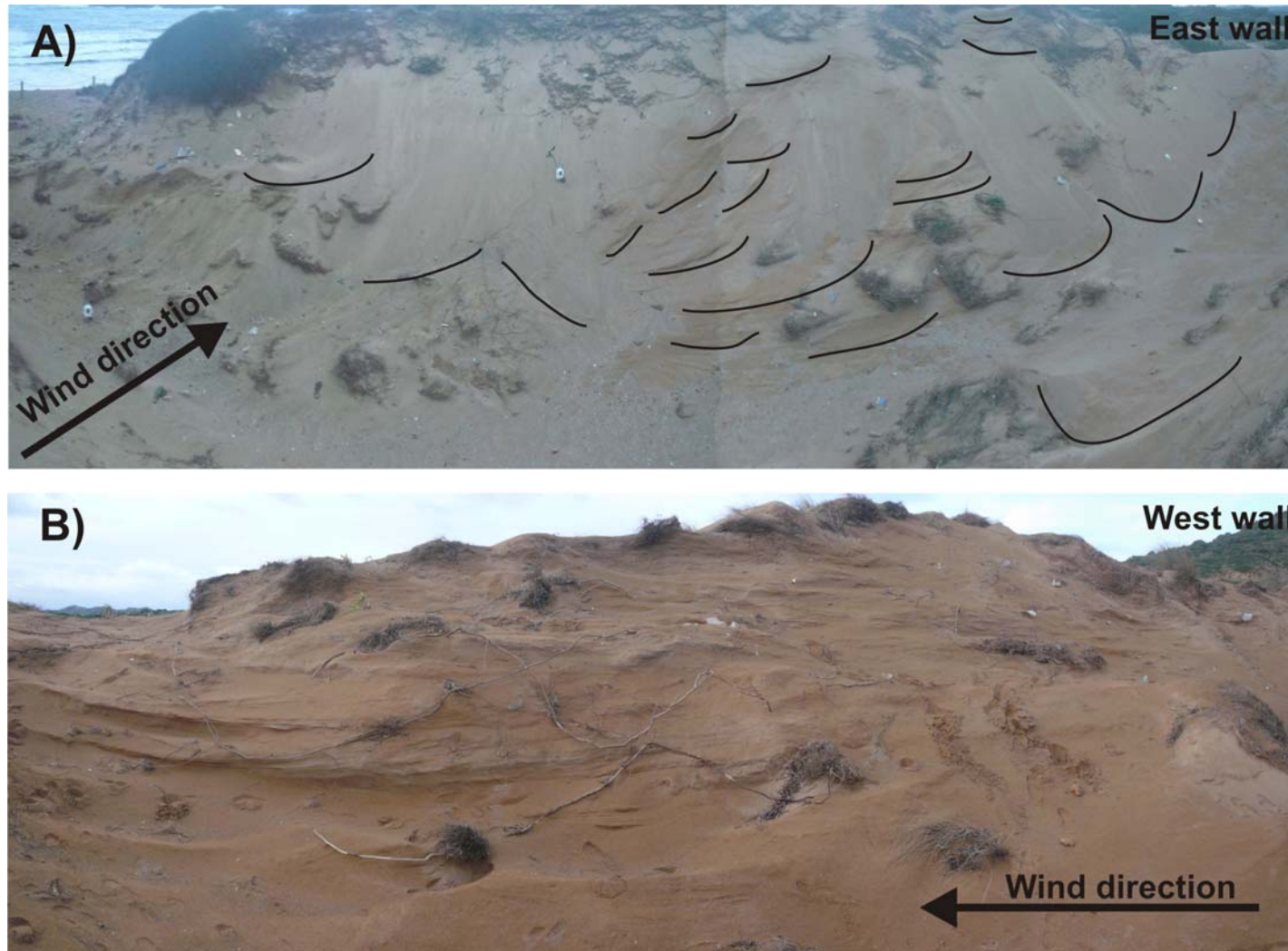
La relació manifesta entre la direcció del vent registrada per cada anemòmetre i la topografia existent queda simulada a la Figura 177, la qual estableix una aproximació del comportament eòlic dintre de la morfologia *blowout* analitzada sota condicions mitges – altes de vent (situació d'hivern). Sota aquest escenari les condicions del flux eòlic experimentat al llarg de les 24 h d'experiment es mostren homogènies dintre de la pròpia morfologia. Si bé la direcció inicial predominant fou de component NO (veure anem. 1 a la Figura 175), el flux eòlic en primera línia es presenta un tant irregular, atribuïble a una major rugositat superficial associada a la presència de vegetació, principalment herbàcia, i de formacions arenoses embrionàries; *echo dunes* i *shadow dunes*. Un cop el flux arriba a la boca del *blowout* – *throat*–, entre els anem. 2 i 3, aquest es canalitza notablement, fet que per extensió es dona al llarg de tot el canal de deflació i la rampa interior. Aquesta tendència és homogènia fins al marge superior del *blowout*, just a on es dona inici el lòbul deposicional. Aquest fet respon doncs al principi de Bernoulli o a l'efecte Venturi, els quals postulen que un flux en moviment al llarg d'un pas estret es concentra, disminueix la seva pressió i incrementa la seva velocitat. Un cop el flux arriba a la part alta de la morfologia perd per complet la pressió estàtica de les parets laterals, la qual cosa suposa una descompressió i divergència del

mateix. Aquest comportament, avalat pel que postulen els dos principis abans esmentats, posa de manifest una relació directa entre el comportament eòlic dintre del *blowout* i les seves condicions topogràfiques.



**Figura 177:** Modelització extrapolada del flux intern dintre de la morfologia *blowout*. Experiment d'hivern a Cala Tirant (Menorca) (Mir-Gual et al., en revisió).

Finalment, destacar la situació registrada en ambdues parets laterals, la qual tindrà també influències directes vers els patrons de transport sedimentari associats. En tant a la paret lateral est la incidència del vent fou pràcticament perpendicular a la seva orientació, suposant doncs una descompressió un cop el flux supera el marge superior lateral (Figura 177). La pressió exercida pel vent en aquest cas, sobretot al llarg de les hores de major intensitat, generà una desestabilització important del sediment provocant continues esllavissades d'arena que per gravetat foren dipositades al llarg de la cubeta de deflació. (Figura 178A). En el cas de la paret lateral oest la situació fou diferent. La incidència del vent es donà paral·lela a la orientació de la mateixa paret (Figura 177), suposant-ne una erosió laminar la qual, d'acord amb la orientació del *blowout*, transportava el sediment directament de cap el lòbul de deposició (Figura 178B).



**Figura 178:** Imatges panoràmiques de les parets laterals del *blowout* i la direcció dels vents principals incidents. Experiment d'hivern a Cala Tirant (Menorca) (Mir-Gual et al., en revisió).

#### 4.2.3.4. Variabilitat d'intensitat a partir de la variable altura; Fractional Speed-up ratio

Com es comentava a l'epígraf 4.2.2.4. l'aplicació del *fractional speed-up ratio* permetia veure les variacions en el flux eòlic un cop aquest s'endinsava dintre de la morfologia *blowout*, tot permetent establir-ne la seva relació amb la topografia existent. En el cas de la situació dibuixada sota condicions d'alta energia eòlica (hivern) aquest fet no és diferent, i si hi cap, és encara més perceptible i notable. Ara l'aplicació del *fractional speed-up ratio* ( $\delta s$ ) es mostra a partir de 13 moments de mostreig – *runs* – de 20 min de durada cada un. Els perfils longitudinals del vent són resultats de les dades dels anem. 1, 2, 3, 4 i 5, prenent com a referència l'anem. 1 (Taula 60 i Figura 179).

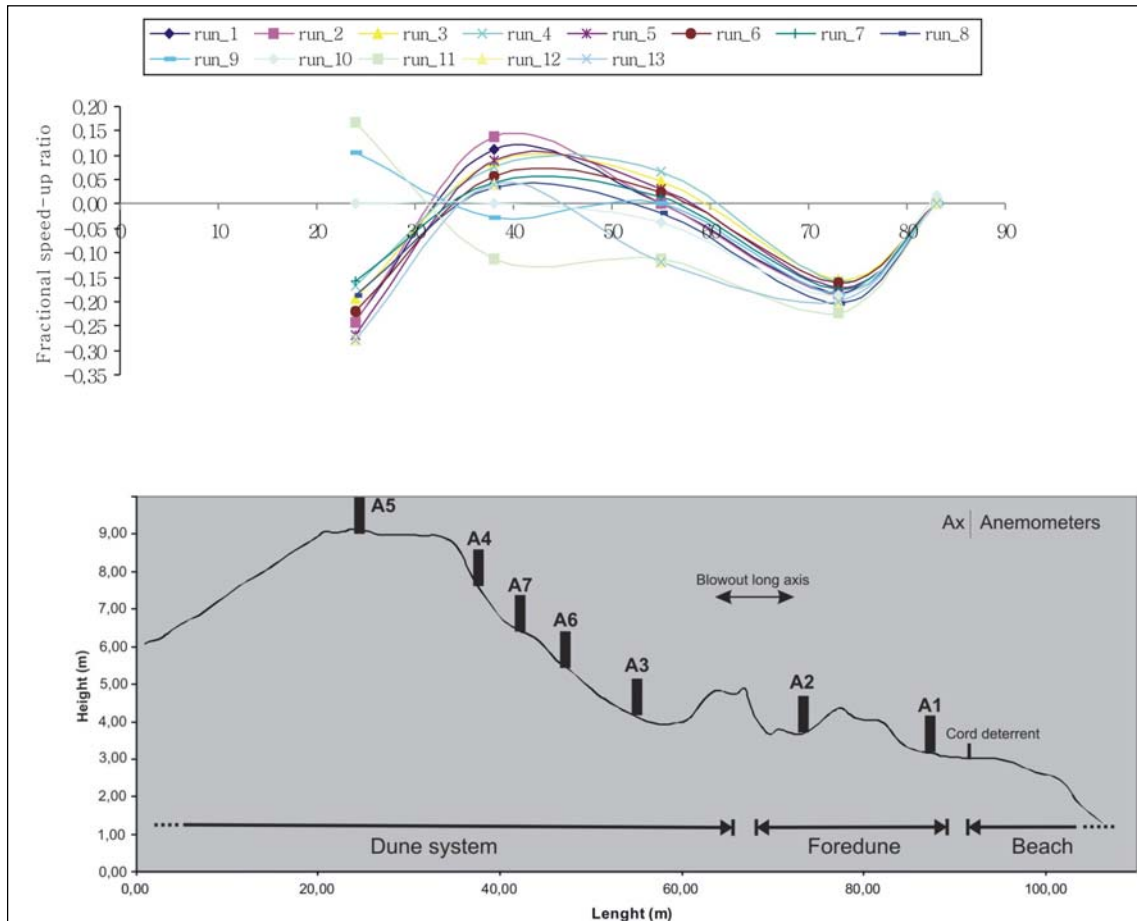
La Figura 179 ens mostra les notables variacions que el flux sofreix al llarg del seu recorregut dintre del *blowout*. Just a la part posterior a la línia de *foredune* per una banda (anem. 2), i al lòbul de deposició per l'altra (anem. 5) la velocitat del vent és generalment més suau que no aquella registrada a la part superior de la platja alta (anem. 1) i a la cubeta de deflació (anem. 3 i 4). La major variabilitat del *speed-up ratio* ( $\delta s = 0.17 / -0.28$ ) es dona al marge superior del *blowout* (anem. 5), mentre que la més baixa es manifesta a la línia de *foredune*, registrada per l'anem. 2 ( $\delta s = -0.15 / -0.22$ ). Endemés, cal destacar la variació que es contempla a la rampa interior del *blowout*, registrada per l'anem. 4 ( $\delta s = 0.14 / -0.11$ ), i a la cubeta de deflació per l'anem. 3 ( $\delta s = 0.07 / -0.12$ ) (Taula 60 i Figura 179). Considerant la desviació estàndard ( $\sigma$ ) resultant, el valor més elevat coincideix amb el punt a on es dona la màxima reducció del *speed-up ratio*, just al marge superior del *blowout* (anem. 5) amb un valor de  $\sigma = 0.15$ , mentre que en aquest cas, el valor mínim coincideix de nou amb la línia de *foredune* (anem. 2) amb  $\sigma = 0.02$  (Taula 60). Des del punt de vista temporal els valors màxims assolits es donen al llarg del *run* 3 ( $\delta s \chi = 0.01$ ) i *run* 2 ( $\delta s \chi = 0.00$ ), mentre que les mínimes es contemplen en els *run* 11 ( $\delta s \chi = -0.08$ ), i *runs* 1, 12 i 13 ( $\delta s \chi = -0.06$ ) (Taula 60). Si les dades obtingudes es comparen amb la distribució de les velocitats absolutes del vent al llarg de les 24 h de mostreig (Figura 174), els valors màxims del *fractional speed-up ratio* coincideixen temporalment amb les màximes velocitats, registrades entre les 08:56-14:00 h del dia 17 de gener, arribant als  $17.9 \text{ ms}^{-1}$  a l'anem. 4 (veure a l'epígraf 4.2.3.1.). Els valors mínims, expressats pels *runs* 12 i 13, també coincideixen temporalment amb les menors velocitats absolutes registrades.



Anàlisi, caracterització i dinàmica de *blowouts* en sistemes de Mallorca i Menorca

	Lenght (m)	Anem. 1	Anem. 2	Anem. 3	Anem. 4	Anem. 5	Anem. 6	Anem. 7	$\delta s \chi$	$\delta s \sigma$	Anem. 1 (ref)
		83	73	55	38	24	47	42			
RUN_1 (09:14-09:34)	uz	8,8	7,2	8,8	9,8	6,7	10	9,5	-0,06	0,15	8,8
	Ratio ( $\delta$ )	0,00	-0,18	0,00	0,11	-0,24	0,14	0,08			
RUN_2 (10:13-10:33)	uz	8,7	7,1	8,7	9,9	6,6	10,1	9,7	0,00	0,16	8,7
	Ratio ( $\delta$ )	0,00	-0,18	0,00	0,14	-0,24	0,16	0,11			
RUN_3 (11:12-11:32)	uz	10,4	8,8	10,9	11,3	8,4	11,3	12,1	0,01	0,13	10,4
	Ratio ( $\delta$ )	0,00	-0,15	0,05	0,09	-0,19	0,09	0,16			
RUN_4 (12:28-12:48)	uz	10,7	9	11,4	11,5	8,9	11,5	11,2	-0,01	0,11	10,7
	Ratio ( $\delta$ )	0,00	-0,16	0,07	0,07	-0,17	0,07	0,05			
RUN_5 (14:20-14:40)	uz	10	8,3	10,3	10,9	7,3	10,8	12	-0,01	0,16	10,0
	Ratio ( $\delta$ )	0,00	-0,17	0,03	0,09	-0,27	0,08	0,20			
RUN_6 (15:16-15:36)	uz	8,6	7,2	8,8	9,1	6,7	9,1	8,9	-0,03	0,11	8,6
	Ratio ( $\delta$ )	0,00	-0,16	0,02	0,06	-0,22	0,06	0,03			
RUN_7 (16:19-16:39)	uz	6,9	5,7	7	7,2	5,8	7,2	8,1	-0,01	0,12	6,9
	Ratio ( $\delta$ )	0,00	-0,17	0,01	0,04	-0,16	0,04	0,17			
RUN_8 (17:23-17:43)	uz	5,9	4,7	5,8	6,1	4,8	6	5,9	-0,05	0,10	5,9
	Ratio ( $\delta$ )	0,00	-0,20	-0,02	0,03	-0,19	0,02	0,00			
RUN_9 (18:25-18:45)	uz	3,8	3,1	3,8	3,7	4,2	3,2	4,4	-0,02	0,13	3,8
	Ratio ( $\delta$ )	0,00	-0,18	0,00	-0,03	0,11	-0,16	0,16			
RUN_10 (20:27-20:47)	uz	2,748387	2,196774	2,6	2,7	2,7	2,2	3,2	-0,03	0,13	2,7
	Ratio ( $\delta$ )	0,02	-0,19	-0,04	0,00	0,00	-0,19	0,19			
RUN_11 (22:25-22:45)	uz	1,8	1,4	1,6	1,6	2,1	1	2,1	-0,08	0,22	1,8
	Ratio ( $\delta$ )	0,00	-0,22	-0,11	-0,11	0,17	-0,44	0,17			
RUN_12 (00:26-00:46)	uz	2,5	2	2,2	2,6	1,8	2,3	3	-0,06	0,16	2,5
	Ratio ( $\delta$ )	0,00	-0,20	-0,12	0,04	-0,28	-0,08	0,20			
RUN_13 (03:26-03:46)	uz	2,5	2	2,2	2,6	1,8	2,3	3	-0,06	0,16	2,5
	Ratio ( $\delta$ )	0,00	-0,20	-0,12	0,04	-0,28	-0,08	0,20			
$\delta s \chi$		0,00	-0,18	-0,02	0,04	-0,15	-0,02	0,13			
$\delta s \sigma$		0,00	0,02	0,06	0,06	0,15	0,17	0,07			

**Taula 60:** Velocitat mitjana del vent per a cada un dels anemòmetres despleats ( $u_z$ ) i els seus respectius valors estandarditzats de l'aplicació del *fractional speed-up ratio* ( $\delta s$ ) calculats a partir de 13 moments de mostreig – *runs* – de 20 min de durada. Addicionalment es presenta la mitjana ( $\delta s \chi$ ) i la desviació estàndard ( $\delta s \sigma$ ) per a cada sensor i per a cada moment de mostreig. Experiment d'hivern a Cala Tirant (Mir-Gual et al., en revisió).

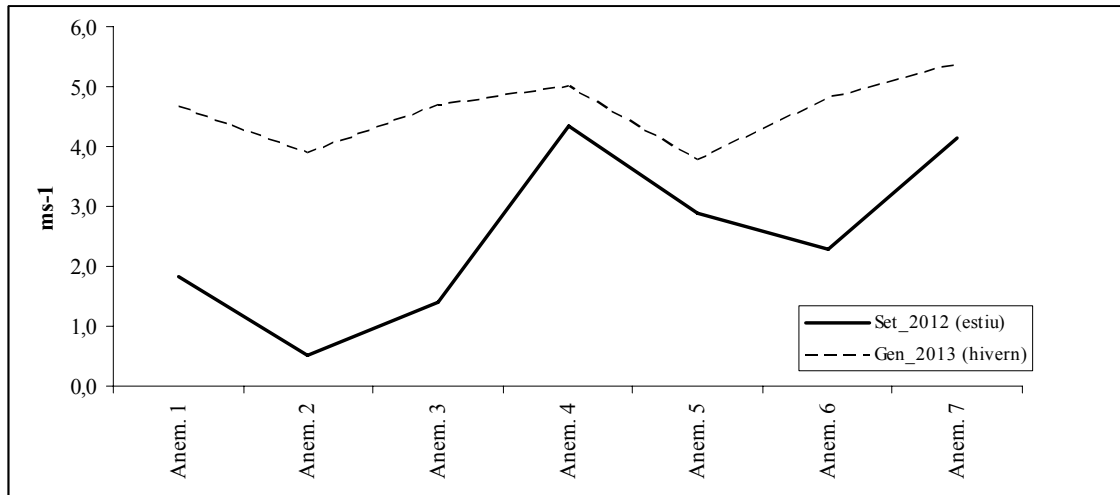


**Figura 179:** *Fractional speed-up ratio* dintre de la morfologia *blowout* de Cala Tirant en l'experiment d'hivern. Els perfils longitudinals estan fets a partir dels anem. 1, 2, 3, 4 i 5, prenent com a referència l'anem. 1. Els anem. 6 i 7 no s'inclouen a la gràfica ja que no estaven disposats en el mateix transecte longitudinal (Mir-Gual et al., en revisió).

#### 4.2.4. Comparativa de la dinàmica eòlica entre les dues situacions, hivern-estiu

Les diferències energètiques entre els dos experiments duts a terme en el *blowout* de Cala Tirant queden prou manifestes a partir dels resultats obtinguts. Aquestes s'han de contemplar des de dues perspectives; l'espacial i la temporal. Pel que respecte a la primera existeix una certa correlació pel que fa al perfil dibuixat a partir de les velocitats mitjanes enregistrades per cada un dels anemòmetres al llarg d'ambdues campanyes de camp (Figura 180). Tal i com ja ens reflectien les figures referides als *fractional speed-up ratio* (Figures 173 i 179) el comportament del flux eòlic, tot i que amb diferents intensitats energètiques, dibuixa una disminució de la seva velocitat un cop aquest supera la línia de *foredune* (anem. 2), i un progressiu augment a mesura que s'endinsa dintre del *blowout* (anem. 3 i 4), fins arribar al lòbul de deposició (anem. 5). Pel que fa a les parets laterals (anem. 6 i 7) la canalització del flux i el conseqüent

augment de la seva velocitat també queden reflectits. En termes generals aquesta tendència és més acusada en situació de calma, sobretot en el traç ascendent entre l'anem. 2 i el 4 (Figura 180). Un altre aspecte compartit en ambdues situacions esdevé en veure com la màxima velocitat en el perfils de vent calculats (anem. 1, 2, 3, 4 i 5) es manifesta a la rampa interior del *blowout* (anem. 4), i que un cop perd la força estàtica de la topografia, aquesta disminueix de nou (anem. 5).



**Figura 180:** Comparativa entre la distribució espacial de la velocitat mitjana del vent entre els dos experiments duts a terme en el *blowout* de Cala Tirant (Menorca).

En termes quantitius – des del punt de vista de la intensitat energètica incident – les diferències són evidents, reflectides a la Taula 61. La velocitat mitjana registrada a la campanya de Setembre de 2012 es fixa en els  $2.5 \text{ ms}^{-1}$ , mentre que en el cas de la duta terme al Gener de 2013 aquesta gairebé es duplica, amb un valor de  $4.6 \text{ ms}^{-1}$ .

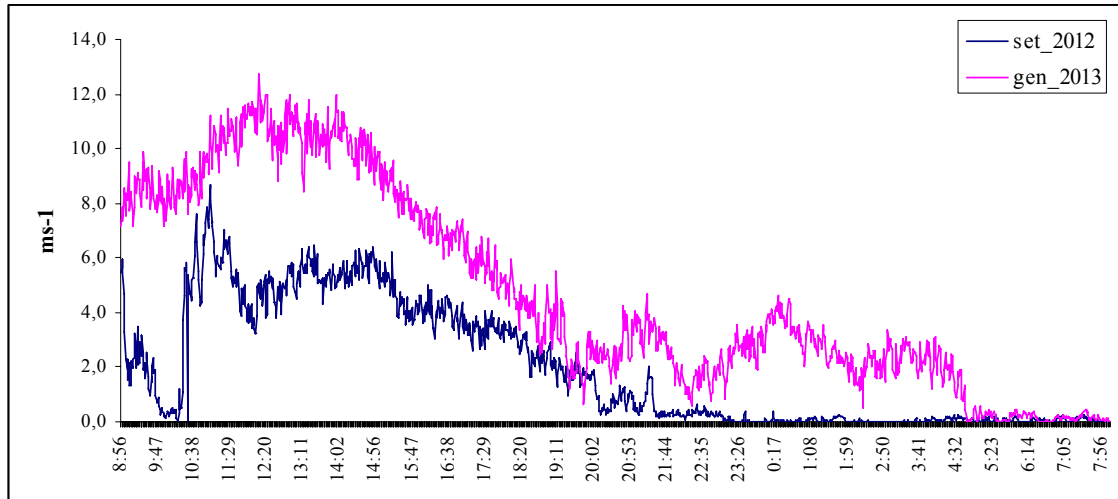
	Anem. 1	Anem. 2	Anem. 3	Anem. 4	Anem. 5	Anem. 6	Anem. 7	$\chi$
<b>Set_2012 (estiu)</b>	1,8	0,5	1,4	4,4	2,9	2,3	4,2	2,5
<b>Gen_2013 (hivern)</b>	4,6	3,9	4,7	5,0	3,8	4,8	5,4	4,6

\*Valors expressats en ms<sup>-1</sup>

**Taula 61:** Comparativa entre les velocitats mitjanes registrades per cada sensor durant els dos experiments duts a terme al *blowout* de Cala Tirant (Menorca).

Una situació semblant es dona si comparem les dues campanyes des del punt de vista temporal (Figura 181). La tendència seguida en ambdós casos és similar, amb velocitats més elevades al llarg del dia i amb una disminució notable durant la nit. Les màximes velocitats, en ambdues situacions, es donen al llarg del matí, entre l'inici dels

experiments (al voltant de les 08:00h) i el començament de la tarda (entre les 14:00-15:00 h). A partir d'aquest punt s'inicia una davallada progressiva de la velocitat del vent – un tant més sostinguda en el cas de la campanya de gener – fins arribar a ser gairebé nul·la a partir de les 05:00 h.

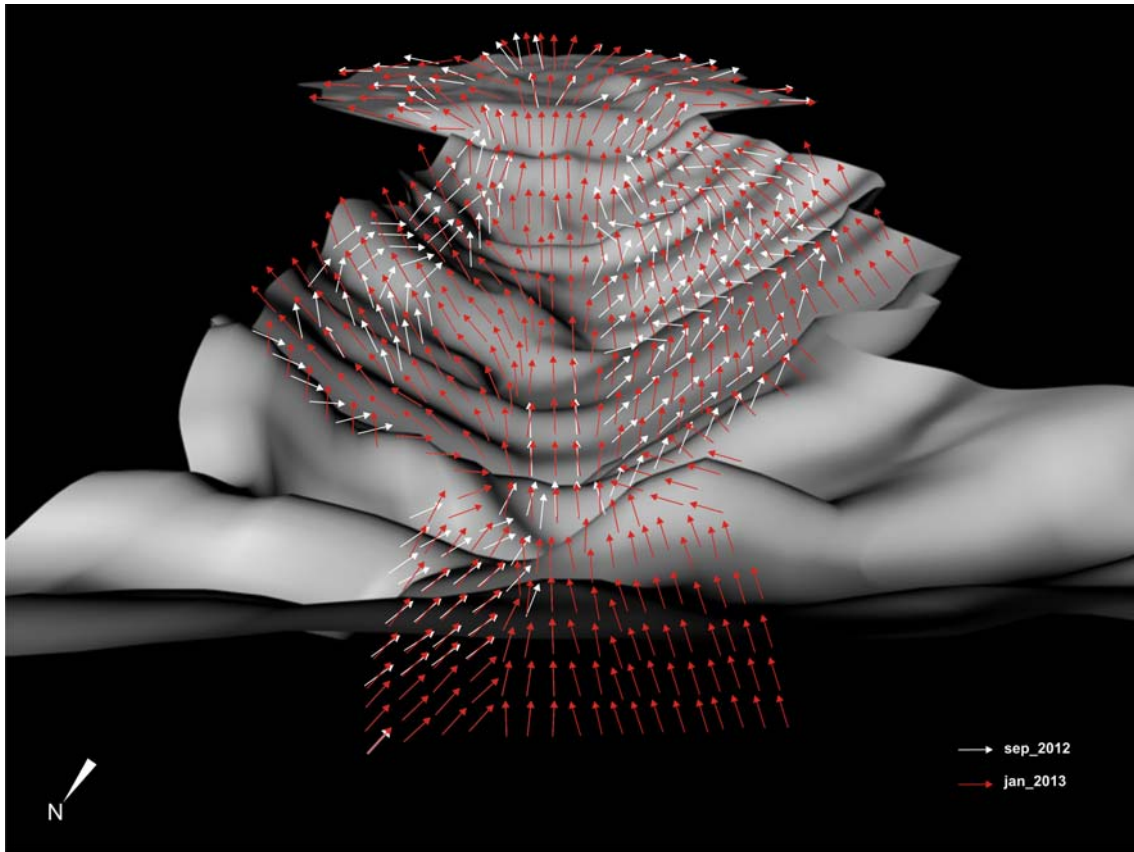


**Figura 181:** Comparativa entre la distribució temporal de la velocitat del vent entre els dos experiments duts a terme en el *blowout* de Cala Tirant (Menorca).

Finalment, cal esmentar algunes consideracions en referència al comportament del flux eòlic dintre del *blowout*. De la comparativa entre les modelitzacions fetes a partir de cada situació es perceben alguns aspectes a comentar. En aquest sentit la Figura 182 indica el solapament entre els dos escenaris obtinguts. Inicialment, durant la situació d'hivern es veu una major heterogeneïtat vers la incidència del flux a la zona d'input eòlic, mentre que aquesta es redueix si es contempla la situació obtinguda a l'estiu. La distribució direccional del flux un cop entra dintre del *blowout* és notablement similar si es compara amb el canal de deflació, la rampa interior i el lòbul de deposició. Al llarg de les dues primeres zones es dibuixa una canalització gairebé unidireccional del flux influenciat per la força estàtica exercida per les dues parets laterals. D'altra banda, s'estableix una notable coincidència amb el comportament que aquest assoleix un cop el lòbul deposicional, amb una expansió considerable.

La situació canvia a les parets laterals. Pel que fa a la paret est la velocitat és homogènia a la part inferior de la mateixa, no obstant aquesta divergeix a la part superior. En la situació de calma (set\_2012) el flux es reconduïx seguint l'encaixament del propi *blowout*, i acaba descomprimint – a l'igual que la cubeta de deflació – de cap al lòbul de deposició. No obstant, sota condicions més energètiques (gen\_2013) la

incidència del vent és gairebé perpendicular a la paret est, descomprimint un cop supera el seu marge superior. Pel que fa a la paret oest, sota condicions de calma el flux es presenta força heterogeni i canviant, mentre que sota condicions energètiques més elevades el flux incideix homogèniament, seguint paral·lelament l'orientació de la pròpia paret.



**Figura 182:** Comparativa de la modelització del flux eòlic obtinguda dels dos experiments duts a terme en el *blowout* de Cala Tirant (Menorca).

#### 4.2.5. Dinàmica sedimentària (situació d'estiu)

##### *4.2.5.1. Transport de sediment*

En termes generals la dinàmica sedimentària mesurada a la campanya de camp realitzada al setembre de 2012 al *blowout* de Cala Tirant fou pobra. El primer factor responsable, tal i com ja ha quedat manifestat a l'epígraf anterior, en fou la calma energètica existent al llarg de l'experiment, manifestada per velocitats baixes de vent. Un altre factor a tenir en compte en aquest cas en foren les pluges caigudes al llarg del matí – la pluja durà sols 20 min, no obstant l'arena va romandre humida algunes hores –

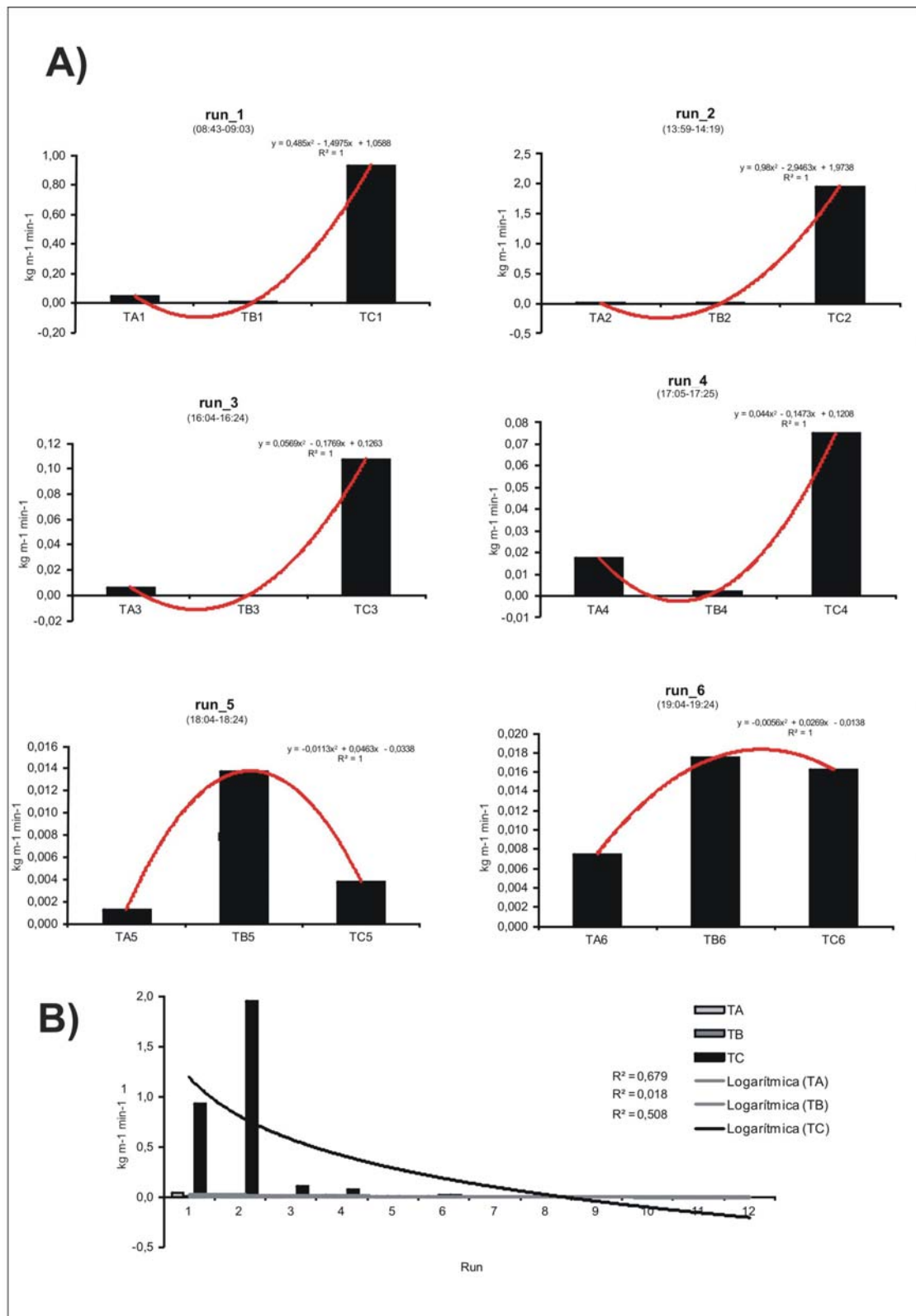
, les quals, i com es veurà en les dades presentades a continuació, forçaren a un buit en el mostreig de transport existent. El transport sedimentari es calculà a partir de 8 *runs* – moments de mostreig – els quals es corresponen amb els utilitzats per a calcular el *Fractional speed-up ratio* (veure Taula 58, epígraf 4.2.2.4.). Les trapes de sediment es disposaren en cada cas al llarg de 20 min (per a veure més extensament la metodologia utilitzada tornar a l'epígraf 2.4.5.).

El transport fou totalment inexistent amb velocitats inferiors als  $2 \text{ ms}^{-1}$ . La màxima quantitat de transport registrada es donà al conjunt de trapes TC – situat al lòbul de deposició – al llarg del *Run* 2, amb un valor fixat en  $Q_{\text{trap}} = 1.955 \text{ kg m}^{-1} \text{ min}^{-1}$  i amb una velocitat mitjana de  $6.3 \text{ ms}^{-1}$  (anem. 5) (Taula 62). El valor més aproximat a l'anterior fou registrat al llarg del *Run* 1, també pel grup de trapes TC, amb un valor de  $Q_{\text{trap}} = 0.931 \text{ kg m}^{-1} \text{ min}^{-1}$  i sota la mateixa velocitat mitjana;  $6.3 \text{ ms}^{-1}$  (anem. 5). No obstant, la resta de quantitats registrades per cada grup de trapes al llarg dels diferents *runs* mostrejats fou gairebé insignificant. Els *runs* 7 i 8 no experimenten cap mena de transport, mentre que la resta, mostrejats al llarg de la tarda, experimenta en bona part valors pròxims a 0 (Taula 62).

Temporalment existeix una relació positiva entre els *runs* de major transport i les velocitats més altes de vent. Tenint en compte el buit de mostreig sedimentari al llarg del matí a conseqüència de les pluges, les màximes quantitats de transport (TC1, TC2) es corresponen amb els moments de més intensitat energètica. Aquesta relació queda manifesta al relacionar els períodes dels *runs* 1 i 2 (Taula 62) amb les velocitats de vent corresponents, il·lustrades a la Figura 169 de l'epígraf 4.2.2.1. A partir del *run* 4, a voltant de les 16:00 h la disminució progressiva en la velocitat del vent s'acompanya d'una disminució amb les quantitats de transport.

Run	TA	TB	TC
	Valors en $\text{kg m}^{-1} \text{ min}^{-1}$		
1 (08:43 – 09:03 h)	0,046	0,004	0,931
2 (13:59 – 14:19 h)	0,008	0,001	1,955
3 (16:04 – 16:24 h)	0,006	0,000	0,108
4 (17:05 – 17:25 h)	0,018	0,002	0,075
5 (18:04 – 18:24 h)	0,001	0,014	0,004
6 (19:04 – 19:24 h)	0,008	0,018	0,016
7 (20:05 – 20:25 h)	0,000	0,000	0,000
8 (21:04 – 21:24 h)	0,000	0,000	0,000

**Taula 62:** Quantitats de sediment registrades per a cada grup de trapes en cada un dels respectius *runs* mostrejats. Experiment de setembre de 2012, Cala Tirant (Menorca).



**Figura 183:** Distribució espacial del transport de sediment experimentat en cada un dels *runs* per a cada grup de trames. Les gràfiques corresponents als *runs* 7 i 8 han estat suprimides ja que el transport era nul (veure Taula 62). A la figura A) es mostra la situació específica per a cada *run*, mentre que a la B) es dona la visió general.

No obstant, aquesta relació no queda tant manifesta si es considera des d'una perspectiva espacial, ja que els punts de major transport no es corresponen sempre amb els que registren les velocitats més elevades de vent. La Figura 183A indica que, generalment, les majors quantitats de transport es contempen a TC – localitzat al lòbul de deposició –, mentre que aquestes són inferiors a TA –límit superior de la platja alta – i TB – part posterior de la *foredune* –. Considerant els anemòmetres de referència per a TA (anem. 1), TB (anem. 2) i TC (anem. 5), la Figura 169 de l'epígraf 4.2.2.1. ens il·lustra que les velocitats més elevades es registraren a l'anem. 4, situat a la rampa interior del *blowout*, evitant a pensar doncs que la zona amb velocitats més elevades no és la de major sedimentació.

El total de sediment captat per cada grup és de 0.086 kg m<sup>-1</sup> (TA), 0.039 kg m<sup>-1</sup> (TB) i 3.089 kg m<sup>-1</sup> (TC), posant de manifest l'existència d'una zona més erosiva, i una altra caracteritzada per processos de deposició.

		RUN_1 (08:43- 09:03)	RUN_2 (13:59- 14:19)	RUN_3 (16:04- 16:24)	RUN_4 (17:05- 17:25)	RUN_5 (18:04- 18:24)	RUN_6 (19:04- 19:24)	Resum
Direcció mitjana		297 (ONO)	45 (NE)	48 (NE)	160 (SSE)	2 (N)	17 (N-NE)	95 (E)
TA	N	0,05	0,010	0,01	0	0,005	0,03	0,018
	S	0,05	0,010	0,005	0,06	0	0	0,021
	E	0,08	0,010	0,01	0	0	0	0,017
	O	0,005	0,000	0	0,01	0	0	0,003
Direcció mitjana		210 (SO-SSO)	52 (NE)	12 (N-NE)	16 (N-NE)	/	/	72 (ENE)
TB	N	0,005	0	0	0,009	0	0	0,002
	S	0,000	0	0	0	0	0	0,000
	E	0,010	0	0	0	0	0	0,002
	O	0	0,005	0	0	0,055	0,07	0,022
Direcció mitjana		297 (ONO)	251 (OS0)	327 (NO-NNO)	331 (NNO)	308 (ONO-NO)	319 (NO)	305 (ONO-NO)
TC	N	2,490	6,08	0,24	0,16	0,01	0	1,497
	S	0,055	0,085	0	0,04	0	0,06	0,040
	E	0,07	0,29	0,025	0,075	0	0	0,077
	O	1,110	1,365	0,165	0,025	0,005	0,005	0,446

**Taula 63:** Relació entre la quantitat de sediment captada per a cada trampa i la direcció mitjana del vent. Les dades es mostren en relació a cada un dels *runs*, i en tant a la mitjana global. Els anemòmetres de referència són l'anem. 1 (TA), l'anem. 2 (TB) i l'anem. 5 (TC). Els *runs* 7-12 han quedat eliminats per manca de vent. \* Les dades de transport queden expressades en kg m<sup>-1</sup> min<sup>-1</sup>.



En aquest cas es fa un tant complex establir una relació directa i positiva entre la direcció del vent registrada i la quantitat de sediment retingut corresponent a la mateixa orientació. Tal com indica la Taula 63 la deposició de sediment és inexistent principalment en els casos de TA i TB. En el primer cas, i amb una direcció mitjana fixada en 95°; E, la màxima quantitat es dona a la trampa S, amb 0.021 kg m<sup>-1</sup> min<sup>-1</sup>, això sí, seguida per les N i E, amb 0.018 kg m<sup>-1</sup> min<sup>-1</sup>. El cas de TB és el més distant – envers a la relació que s’ intenta contemplar –, ja que sota una direcció mitjana de 72°; ENE, la màxima quantitat es donà a la trampa O, amb 0.022 kg m<sup>-1</sup> min<sup>-1</sup>. No obstant, en el cas de TC sí es mostra una clara relació entre les dues variables analitzades. Sota una direcció mitjana de 305°; ONO-NO, les màximes quantitats es donaren a les trampes N, amb 1.497 kg m<sup>-1</sup> min<sup>-1</sup> i O, amb 0.446 kg m<sup>-1</sup> min<sup>-1</sup>. Aquest canvi de tendència permet puntualitzar que en el punt de major retenció sedimentària (TC) és a on aquesta relació és més positiva, mentre que en els dos anteriors, amb un transport gairebé insignificant (TA i TB), aquesta disminueix notablement.

#### 4.2.6. Dinàmica sedimentària (situació d’hivern)

##### *4.2.6.1. Transport de sediment*

La campanya de camp realitzada al gener de 2013 fou més complexa des del punt de vista sedimentari que no l’anterior, fet atribuïble a una major intensitat energètica incident. En aquest cas el transport fou mesurat a partir de 13 *runs*, també coincidents en temps amb els utilitzats per a mesurar el *Fractional speed-up ratio*; Taula 60 de l’epígraf 4.2.3.4.). En aquest cas no hi hagué precipitació, fet que va permetre poder tenir una seqüència continua de mostreig.

A grans trets, quantitats molt minses de sediment foren captades amb velocitats de vent inferiors als 2.5 ms<sup>-1</sup>. La quantitat més alta de transport fou registrada sota una velocitat mitjana de 12 ms<sup>-1</sup> (anem. 5), concretament per TC5 amb Qtrap= 46.95 kg m<sup>-1</sup> min<sup>-1</sup>. Tal i com s’apuntava a la campanya de setembre de 2012, temporalment existeix una relació positiva entre els *runs* de major captació sedimentària i aquells amb les velocitats de vent més altes. El transport fou més important al llarg del matí, concretament entre els *runs* 1 i 6 (09:14 – 14:45 h), i menor entre els *runs* 7 i 13 (Figura

184 i Taula 64). Aquesta tendència es relaciona directament amb la disminució de la força del vent a partir de les 14:00 h aproximadament (Figura 174 de l'epígraf 4.2.3.1.).

Moment	Run	Qtrap (kg m <sup>-1</sup> min <sup>-1</sup> )
Matí	TA1	5,14
	TB1	0,99
	TC1	41,41
	TA2	6,13
	TB2	0,92
	TC2	42,64
	TA3	16,62
	TB3	11,13
	TC3	46,46
	TA4	15,71
	TB4	16,02
	TC4	42,17
	TA5	6,40
	TB5	3,43
	TC5	46,95
Tarda	TA6	0,71
	TB6	0,88
	TC6	28,21
	TA7	0,16
	TB7	0,15
	TC7	5,61
	TA8	0,05
	TB8	0,07
	TC8	3,00
Vespre	TA9	0,04
	TB9	0,05
	TC9	2,49
	TA10	0,03
	TB10	0,03
Vespre	TC10	1,81
	TA11	0,01
	TB11	0,01
	TC11	0,54
	TA12	0,01
	TB12	0,035
	TC12	1,494
Vespre	TA13	0,006
	TB13	0,009
	TC13	0,268

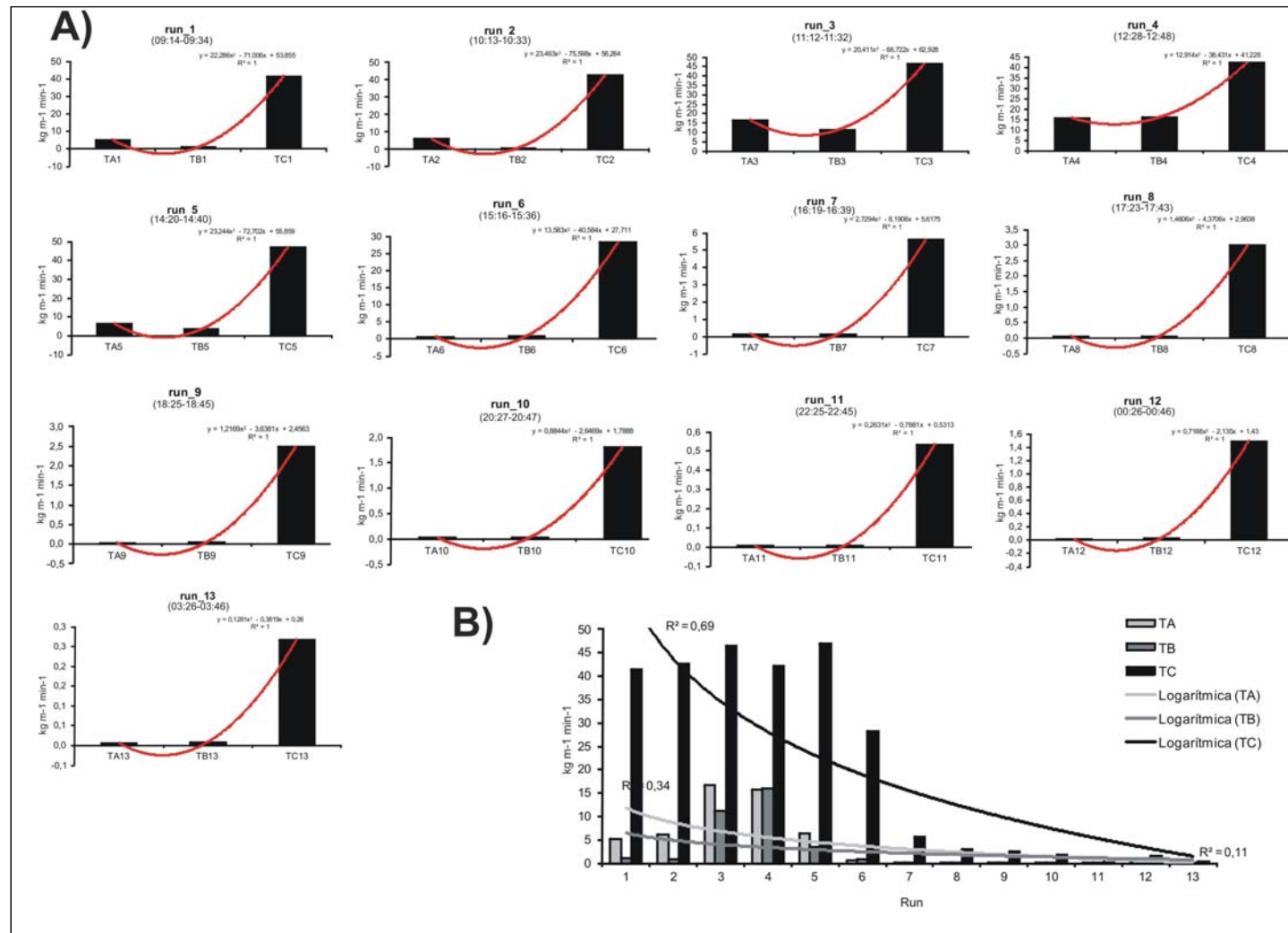
**Taula 64:** Quantitat d'arena captada per cada grup de trapes al llarg dels diferents moments de l'experiment.

La quantitat mitjana de transport al llarg del matí fou  $TA_{Q_{trap}} = 10 \text{ kg m}^{-1} \text{ min}^{-1}$ ,  $TB_{Q_{trap}} = 6.5 \text{ kg m}^{-1} \text{ min}^{-1}$  i  $TC_{Q_{trap}} = 43.9 \text{ kg m}^{-1} \text{ min}^{-1}$ , amb les màximes localitzades als *runs* 3, 4 i 5 (Taula 64). Tot i que el màxim valor de sediment transportat al llarg de la tarda es fixà en  $Q_{trap} = 28.21 \text{ kg m}^{-1} \text{ min}^{-1}$  a TC6, en termes generals els valors foren substancialment més baixos que els registrats al llarg del matí (Taula 64);  $TA_{Q_{trap}} = 0.24 \text{ kg m}^{-1} \text{ min}^{-1}$ ,  $TB_{Q_{trap}} = 0.28 \text{ kg m}^{-1} \text{ min}^{-1}$  i  $TC_{Q_{trap}} = 39.3 \text{ kg m}^{-1} \text{ min}^{-1}$ . Finalment, apuntar que el transport registrat al llarg de la nit fou pràcticament inexistent (*runs* 10-13) degut a que les velocitats mitjanes en aquest període foren inferiors als  $3 \text{ ms}^{-1}$ . Les quantitats mitjanes per aquest període foren de  $TA_{Q_{trap}} = 0.014 \text{ kg m}^{-1} \text{ min}^{-1}$ ,  $TB_{Q_{trap}} = 0.021 \text{ kg m}^{-1} \text{ min}^{-1}$  and  $TC_{Q_{trap}} = 1.02 \text{ kg m}^{-1} \text{ min}^{-1}$ . Si s'analitzen les dades de manera concreta el màxim transport fou registrat a TC5 amb un total de  $Q_{trap} = 46.95 \text{ kg m}^{-1} \text{ min}^{-1}$ , mentre que els mínims es localitzen a TA11, TB11 i TA12 amb  $Q_{trap} = 0.01 \text{ kg m}^{-1} \text{ min}^{-1}$  respectivament (Taula 65).

Run	TA	TB	TC
	Valors in $\text{kg m}^{-1} \text{ min}^{-1}$		
1	5,14	0,99	41,41
2	6,13	0,92	42,64
3	16,62	11,13	46,46
4	15,71	16,02	42,17
5	6,40	3,43	46,95
6	0,71	0,88	28,21
7	0,16	0,15	5,61
8	0,05	0,07	3,00
9	0,04	0,05	2,49
10	0,03	0,03	1,81
11	0,01	0,01	0,54
12	0,01	0,035	1,494
13	0,006	0,009	0,268

**Taula 65:** Quantitat d'arena captada per cada grup de trapes al llarg dels 13 *runs* .

Espacialment no es percep cap relació entre les velocitats més altes de vent i els punts amb major captació sedimentària. El transport capturat fou molt significant a TC, just a l'inici del lòbul deposicional, coincidint amb la zona d'expansió del flux eòlic (epígraf 4.2.3.3.). No obstant els ratis de transport foren notablement inferiors a TA i TB (Taula 65 i Figura 184), localitzats ambdós a la zona d'input i a la boca del *blowout* respectivament, a on les velocitats de vent foren més elevades que en el cas anterior. Remarcar que, si es relacionen les quantitats de sediment captades amb la distribució del vent al llarg de l'experiment (Figura 174 de l'epígraf 4.2.3.1.) es veu com l'anem. 5, referència del grup TC, no és el que registra les velocitats més elevades.



**Figura 184:** Distribució espacial del transport de sediment experimentat en cada un dels *runs* per a cada grup de trapes. Al panell A) es mostra la situació específica per a cada *run*, mentre que al B) es dóna la visió general.

La configuració espacial dels patrons de transport sedimentari fou sostinguda i homogènia al llarg de tot l'experiment, tal i com ens mostra la Figura 184. La tendència polinomial (Figura 184A) es presenta força similar per a cada un dels *runs*, amb un transport moderat a TA, el qual decreix lleugerament a TB, per a finalment créixer exponencialment a TC.

La Figura 184B ens resumeix la tendència de transport sedimentari continuada al llarg de l'experiment. De nou, inclús de manera més clara, queden de nou patents les grans diferències entre el transport captat per TC per una banda, i TA-TB per l'altra, sobretot al llarg del mati (*runs* 1-6). Les majors quantitats de transport es donaren als *runs* 3, 4 i 5, amb valors superiors als  $45 \text{ kg m}^{-1} \text{ min}^{-1}$ . El transport començà a disminuir notablement entre el run 6 (15:16 - 15:36 h;  $29.79 \text{ kg m}^{-1} \text{ min}^{-1}$ ) i run 7 ( $5.92 \text{ kg m}^{-1} \text{ min}^{-1}$ ) (Taula 65), coincidint amb el moment en el que el vent començà també a perdre intensitat (Figura 174 de l'epígraf 4.2.3.1.). Concloent, el transport total mostrejat al llarg de l'experiment es fixa amb  $TA = 51 \text{ kg m}^{-1}$ ,  $TB = 33.71 \text{ kg m}^{-1}$  and  $TC = 263 \text{ kg m}^{-1}$ .

Finalment, per a concloure amb la caracterització del transport al llarg de la campanya de gener de 2013 cal tornar a la Figura 177 de l'epígraf 4.2.3.3. La recurrent incidència d'un flux perpendicular a l'orientació de la paret lateral est, principalment al llarg del període de major intensitat eòlica (entre les 09:00 – 14:00 h) suposà continues esllavissades d'arena que, per gravetat, es dipositaven sobre el canal de deflació. Pel que fa a la situació de la paret oest, la incidència del flux en aquest cas era paral·lela a l'orientació de la mateixa, suposant una erosió sedimentària de caràcter laminar. Ambdós casos derivaren amb palpables modificacions morfològiques dintre de la morfologia *blowout*, alhora que condicionaren els patrons de transport. En el primer cas, l'arena era dipositada al canal de deflació que, sota la canalització del flux i la seva intensificació energètica, era conseqüentment transportat cap al lòbul de deposició. En el segon cas aquest transport era directe.

En aquest cas la relació entre la direccionalitat del vent i la captura de sediment vers a la mateixa orientació és notablement positiva en cada un dels casos (Taula 66). En el cas de TA, amb una direcció mitjana fixada en  $312^\circ$ ; NO, les màximes quantitats retingudes es donaren a les trapes N, amb  $13.623 \text{ kg m}^{-1} \text{ min}^{-1}$  i O, amb  $0.704 \text{ kg m}^{-1} \text{ min}^{-1}$ . No obstant, destacar també la quantitat registrada per la trampa S, inclús lleugerament superior al cas anterior, amb  $0.785 \text{ kg m}^{-1} \text{ min}^{-1}$ .

		RUN_1 (09:14- 09:34)	RUN_2 (10:13- 10:33)	RUN_3 (11:12- 11:32)	RUN_4 (12:28- 12:48)	RUN_5 (14:20- 14:40)	RUN_6 (15:16- 15:36)	RUN_7 (16:19- 16:39)	RUN_8 (17:23- 17:43)	RUN_9 (18:25- 18:45)	RUN_10 (20:27- 20:47)	RUN_11 (22:25- 22:45)	RUN_12 (00:26- 00:46)	RUN_13 (03:26- 00:46)	Resum
	Direcció mitjana	318 (NO)	321 (NO-NNO)	315 (NO)	315 (NO)	315 (NO)	311 (NO)	315 (NO)	314 (NO)	302 (ONO-NO)	302 (ONO-NO)	293 (ONO)	322 (NO-NNO)	313 (NO)	312 (NO)
TA	N	13,890	23,015	57,655	58,290	21,930	2,125	0,050	0,045	0,030	0,020	0,010	0,025	0,010	13,623
	S	0,040	0,170	4,395	1,790	2,575	0,425	0,560	0,110	0,075	0,055	0,005	0,005	0,005	0,785
	E	1,825	0,920	2,625	1,195	0,655	0,235	0,005	0,030	0,015	0,015	0,005	0,010	0,005	0,580
	O	4,785	0,410	1,790	1,570	0,445	0,055	0,010	0,030	0,020	0,015	0,005	0,015	0,005	0,704
	Direcció mitjana	337 (NNO)	289 (ONO)	337 (NNO)	337 (NNO)	337 (NNO)	337 (NNO)	337 (NNO)	337 (NNO)	330 (NNO)	311 (NO)	324 (NO-NNO)	273 (O)	288 (ONO)	321 (NO-NNO)
TB	N	2,915	2,280	22,790	30,310	6,100	0,385	0,035	0,000	0,065	0,030	0,005	0,060	0,005	4,998
	S	0,060	0,015	1,695	12,195	4,225	2,820	0,500	0,145	0,085	0,070	0,010	0,045	0,010	1,683
	E	0,395	0,415	4,260	2,135	0,725	0,075	0,030	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,618
	O	0,575	0,970	15,760	19,455	2,680	0,220	0,050	0,065	0,040	0,030	0,015	0,035	0,020	3,070
	Direcció mitjana	308 (NO-ONO)	265 (O)	318 (NO)	313 (NO)	301 (ONO-NO)	310 (NO-ONO)	294 (ONO)	298 (ONO-NO)	306 (NO-ONO)	308 (NO-ONO)	307 (NO-ONO)	322 (NO-NNO)	308 (NO)	304 (ONO-NO)
TC	N	112,925	111,835	113,000	100,180	100,665	56,750	18,990	11,745	9,785	7,095	2,050	5,870	1,000	50,145
	S	0,225	0,580	6,300	3,000	7,370	10,605	1,175	0,030	0,020	0,015	0,010	0,010	0,005	2,257
	E	1,575	0,670	2,245	0,855	8,135	2,640	0,125	0,085	0,065	0,045	0,030	0,035	0,025	1,272
	O	50,910	57,465	64,285	64,625	71,640	42,830	2,150	0,130	0,105	0,075	0,050	0,060	0,040	27,259

**Taula 66:** Relació entre la quantitat de sediment captada per cada trampa i la direcció mitjana del vent. Les dades es mostren en relació a cada un dels *runs*, i en tant a la mitjana global. Els anemòmetres de referència són l'anem. 1 (TA), l'anem. 2 (TB) i l'anem. 5 (TC). \* Les dades de transport queden expressades en  $\text{kg m}^{-1} \text{min}^{-1}$ .

En el cas de TB, la direcció mitjana registrada fou de 321°; NO-NNO, amb les màximes quantitats de sediment retingudes per les trampes N, amb 4.998 kg m<sup>-1</sup> min<sup>-1</sup>, i O amb 3.070 kg m<sup>-1</sup> min<sup>-1</sup>. Finalment, la situació de TC és la que millor reflecteix aquesta relació directa entre ambdues variables. Sota una direcció mitjana fixada en 304°; ONO-NO, les màximes de transport es donaren a les trampes N, amb 50.145 kg m<sup>-1</sup> min<sup>-1</sup> i O, amb 27.259 kg m<sup>-1</sup> min<sup>-1</sup>.

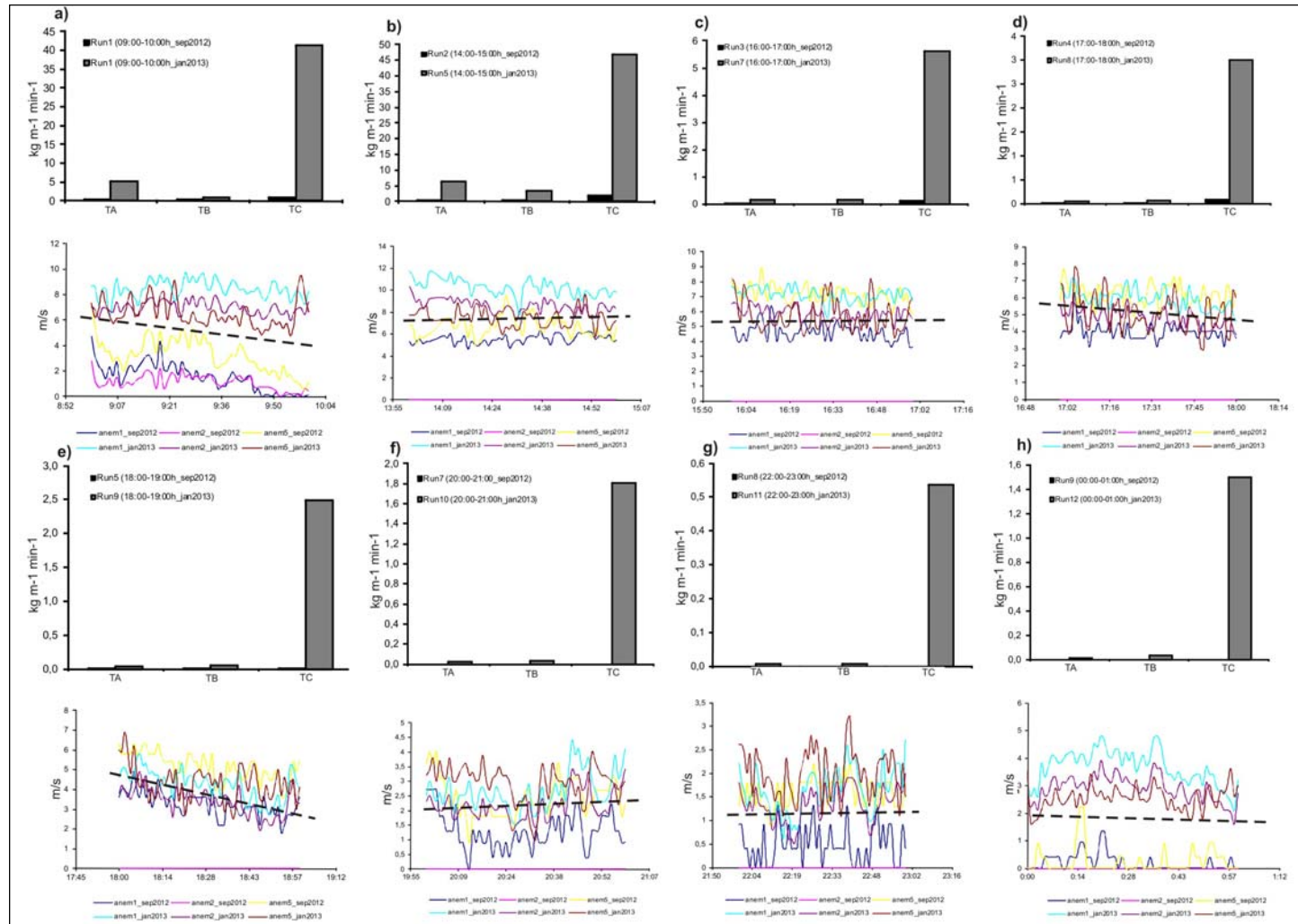
#### 4.2.7. Comparativa de la dinàmica sedimentària entre les dues situacions, hivern-estiu

Les notables diferències experimentades en tant el transport de sediment mesurat en cada una de les dues campanyes de camp realitzades al *blowout* de Cala Tirant queden explicades per les distintes intensitats energètiques, posant així de manifest la importància que el vent té al respecte (Figura 185). La comparativa entre ambdós escenaris es du a terme a partir de la comparació d'un total de 8 *runs* per campanya, fent-los coincidir temporalment. Les diferències no són en cap cas puntuals, sinó que esteses en cada una de les comparacions, a on es veu com en cada cas el transport a la campanya del gener de 2013 – alta energia eòlica – supera el corresponent a la campanya del setembre de 2012 – baixa energia eòlica – (Taula 67).

Run	Sep 2012		Gen 2013	
	Grup	Qtrap (kg m <sup>-1</sup> min <sup>-1</sup> )	Run	Qtrap (kg m <sup>-1</sup> min <sup>-1</sup> )
Run1 (9:00-10:00h)	TA	0,046	Run1 (9:00-10:00h)	5,14
	TB	0,004		0,99
	TC	0,931		41,41
Run2 (14:00-15:00h)	TA	0,008	Run5 (14:00-15:00h)	6,40
	TB	0,001		3,43
	TC	1,955		46,95
Run3 (16:00-17:00h)	TA	0,006	Run7 (16:00-17:00h)	0,16
	TB	0,000		0,15
	TC	0,108		5,61
Run4 (17:00-18:00h)	TA	0,018	Run8 (17:00-18:00h)	0,05
	TB	0,002		0,07
	TC	0,075		3,00
Run5 (18:00-19:00h)	TA	0,001	Run9 (18:00-19:00h)	0,04
	TB	0,014		0,05
	TC	0,004		2,49
Run7 (20:00-21:00h)	TA	0,000	Run10 (20:00-21:00h)	0,03
	TB	0,000		0,03
	TC	0,000		1,81
Run8 (22:00-23:00h)	TA	0,000	Run11 (22:00-23:00h)	0,01
	TB	0,000		0,01
	TC	0,000		0,54
Run9 (00:00-01:00h)	TA	0,000	Run12 (00:00-01:00h)	0,01
	TB	0,000		0,035
	TC	0,000		1,494

**Taula 67:** Comparativa entre el transport sedimentari entre les dues campanyes de camp realitzades al *blowout* de Cala Tirant (Menorca).





**Figura 185:** Comparativa en el transport sedimentari i la velocitat del vent entre les dues campanyes de camp realitzades al *blowout* de Cala Tirant (Menorca).

# Capítol 5

---

**El qui puja una escala ha de començar pel primer escaló**  
*(Walter Scott)*

**Modelitzacions CFD**  
*(Computational Fluid*  
*Dynamics)*. Cas d'estudi al  
*blowout* de Cala Tirant  
(Menorca)



**CAPÍTOL 5 MODELITZACIONS CFD (*Computational Fluid Dynamics*). CAS D'ESTUDI AL *BLOWOUT* DE CALA TIRANT (MENORCA)**

Com s'ha vist, el capítol 4 tractava en part l'anàlisi de la dinàmica eòlica i sedimentària enregistrada al llarg de dos experiments duts a terme a un *blowout* situat a la primera línia de dunes del sistema de Cala Tirant a Menorca (a partir de l'epígraf 4.2.2.). Tal anàlisi s'ha dut a terme a partir de la informació empírica obtinguda del registre de sensors de vent i trapes de sediment utilitzades al llarg de 24 hores de mostreig. Tot i que les tècniques de mostreig *in situ* continuen esdevenint claus vers la caracterització de la dinàmica eòlica en sistemes platja-duna, tècniques recents apunten a completar la capacitat científica per a millorar-ne la seva interpretació amb òptima precisió, alhora que també plantejar possibles escenaris futurs.

La complexitat geomorfològica i superficial de sistemes dunars, degudes les seves recurrents irregularitats i l'alt grau de rugositat associat, suposa una entrebanc afegit vers la precisa caracterització del flux eòlic un cop aquest impacta contra les pròpies morfologies. Com ja era apuntat a l'apartat 1.8, i més concretament a l'epígraf 1.8.3., aplicacions recents, entre elles les modelitzacions de fluids conegudes com a CFD (*Computational Fluid Dynamics*) han contribuït a incrementar el coneixement sobre el funcionament del flux eòlic incident sobre sistemes dunars, especialment vers a *lee* de les morfologies i també, vers als fluxos secundaris derivats de l'efecte topogràfic. Tot i ser encara una tècnica escassament aplicada sobre sistemes de dunes litorals, un dels punts inicials d'experimentació s'ha basat amb l'anàlisi de la incidència eòlica sobre morfologies *blowouts* (Smyth et al., 2011; 2012; 2013).

Enfront a l'escenari descrit, el present capítol té com a objectiu principal introduir algunes modelitzacions CFD aplicades sobre el *blowout* analitzat en el sistema de Cala Tirant (Menorca), completant així el treball de camp i el test empíric reflectit al capítol 4. No es pretén, però, més que establir una primera introducció sobre aquesta tècnica dins la literatura de les Illes Balears, establint-se així com a primer antecedent al respecte dins del marc de la geomorfologia litoral a nivell regional i també, a Espanya. L'estat incipient enfront a l'aplicació de models CFD sobre sistemes dunars fa que avui, encara, sigui una tècnica en procés de millora. No obstant, cal dir que algunes comparacions avalen la precisió dels resultats obtinguts i de la seva semblança vers a experiments en camp (Smyth et al., 2012).

## 5.1. Models sota condicions de baixa energia (estiu)

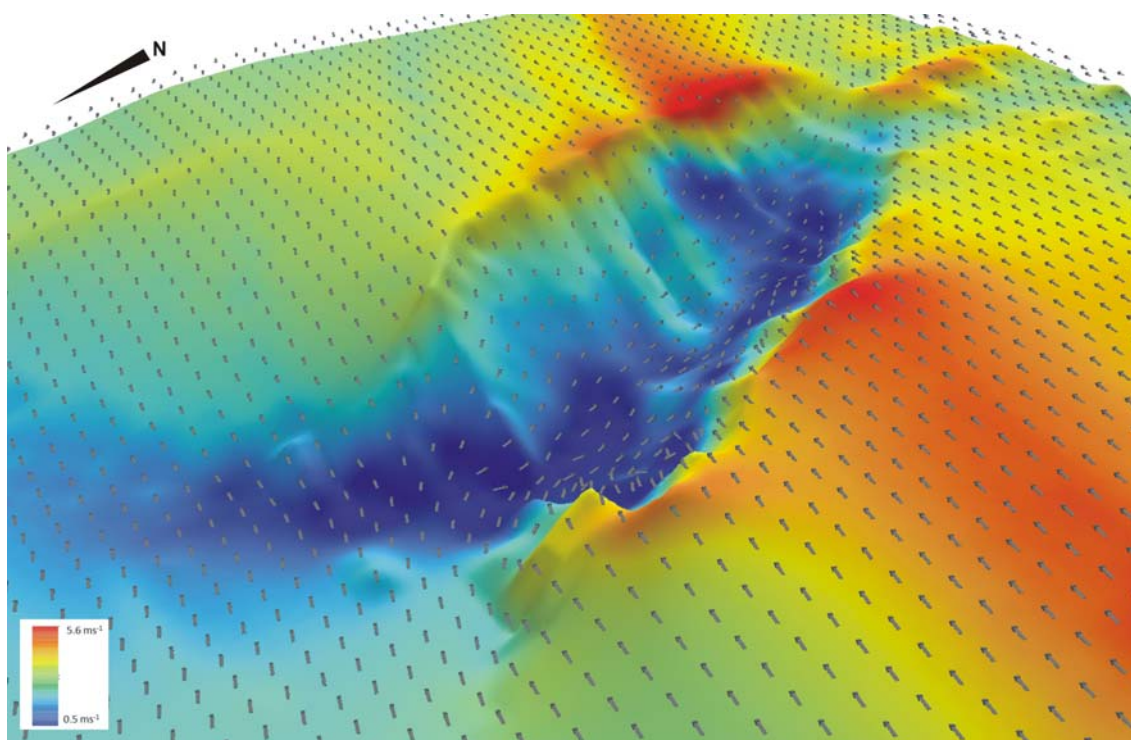
Els models que es presenten en aquest epígraf s'han basat amb les condicions registrades per l'anemòmetre 1 al llarg de la campanya de camp duta a terme al *blowout* de Cala Tirant, entre els dies 4 i 5 de setembre de 2012. Les condicions eòliques parteixen del registre d'input recollit per l'anemòmetre esmentat, situat a la part superior de la platja emergida a 40 cm per sobre de la superfície, i que s'expliquen amb una velocitat màxima mitjana de  $2.5 \text{ ms}^{-1}$  i amb una direcció mitjana de  $340^\circ$ . En el cas del model referent als vectors i velocitat del flux eòlic, aquest ha estat construït amb fletxes direccionals a una resolució d'1 m i a 0.5 m per a sobre de la superfície. Els models es limiten a l'interior del *blowout* analitzat i a les zones circumdants més pròximes, mentre que la resta passa per una extrapolació feta pel software Surfer<sup>TM</sup>.

### 5.1.1. Vectors, velocitat i línies de flux eòlic incident

La Figura 186 ens mostra els vectors de direcció del flux incident i la seva velocitat a l'interior de la morfologia *blowout*. Es veu com un cop el flux arriba a la boca del *blowout* – *throat* – experimenta una notable canalització, condicionada en bona part pel control topogràfic exercit, en aquest cas per les parets laterals. Un cop dintre de la morfologia s'experimenten fluxos secundaris de retorn a la paret oest interna, situada a sobrevent. Com s'aprecia a la imatge, es produeixen certes turbulències que inciten a pensar amb la separació del flux, complementada també per una disminució de la seva velocitat. Una situació diferent és la que es pot apreciar en el cas de la paret oriental, exposada a sotavent, i que serveix de plataforma de descompressió del flux cap a fora de la pròpia morfologia, per a sobre del marge superior. Cal fer menció especial també a la diferència de velocitat existent en ambdós casos. Com es veu, les velocitats del vent a la paret oest, situada a sotavent i relativament protegida – per la topografia – del flux incident, són lleugerament inferiors a les que es donen a la paret est, exposada en aquest cas a una major incidència dels vents predominants de NNO.

El comportament del flux eòlic un cop s'insereix dintre del *blowout* és relativament homogeni i senzill, condicionat, això si, pel control topogràfic exercit.

Seguint els patrons ja comentats a la boca del *blowout*, es produeix una notable canalització i uniformitat del flux al llarg del canal de deflació, més o manco homogènia fins a la rampa interior. Pel que fa als laterals, la paret occidental segueix tenint un comportament un tant més heterogeni, pot ser pel factor afegit d'estar a sobrevent de la incidència del flux principal. Es pot observar com, com tot i marcar una tendència de flux canalitzat més o manco paral·lel a la orientació de la mateixa paret, es perceben alguns comportaments de reflux que dibuixen una certa heterogeneïtat. Mentrestant, el marge oriental, exposat al flux incident, segueix postulant-se com una plataforma de descompressió. En aquest cas es percep també, inclús més nítidament, que a la paret est, més exposada, les velocitats són lleugerament superiors a les mostrades pel marge occidental.



**Figura 186:** Model de la velocitat i direcció del flux a 1 m per sobre de la superfície i sota una direcció de 340° a l'anemòmetre 1 (situació d'estiu). Les fletxes es troben separades en intervals de 2 m i indiquen la direcció del flux a 1 m per a sobre de la superfície, mentre que la coloració reflecteix la velocitat del mateix.

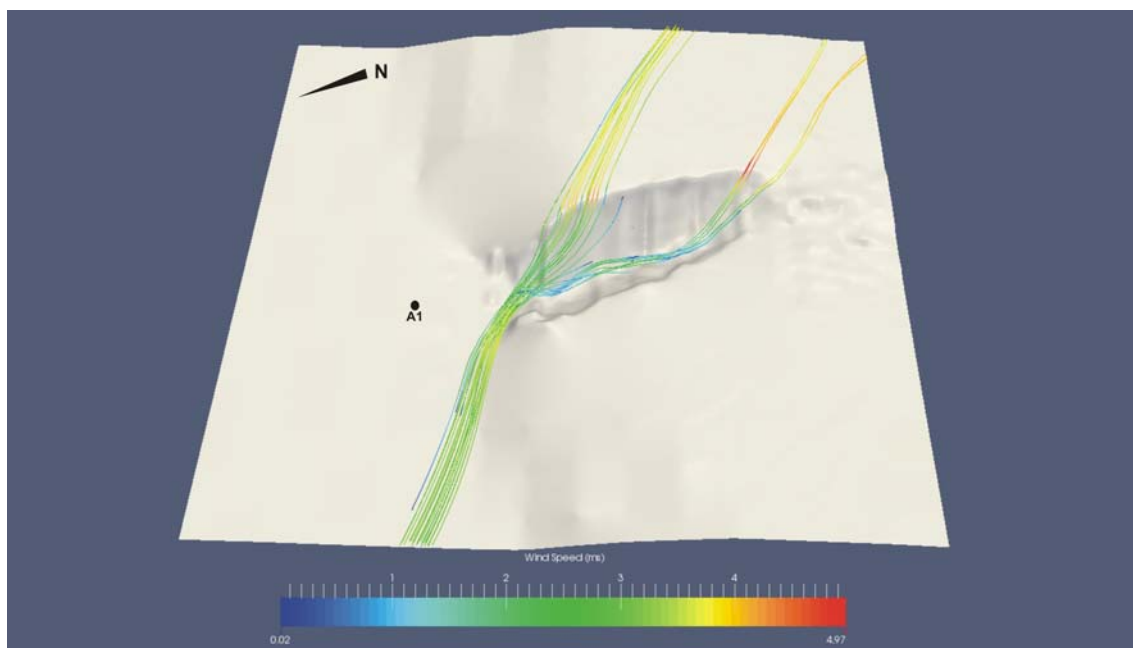
La importància de la topografia vers el comportament del flux sembla quedar manifest, no sols per la canalització que aquesta suposa a la part central, sinó també per la seva laxitud a la zona posterior del *blowout*. La Figura 186 mostra com el flux perd la pressió estàtica de les parets laterals un cop arriba a la part superior de la rampa interior, i més encara al lòbul de deposició. La direcció del flux a la zona més interior segueix la

tendència dels vents incidents de NNO, només lleugerament alterada per a topografia positiva del lòbul de deposició.

Si s'analitza una mica amb més detall les velocitats del vent segons el present model hi caben algunes consideracions a tenir en compte. Tot sigui dit abans que les condicions energètiques sota les quals el model ha estat realitzat són força baixes ( $2.5 \text{ ms}^{-1}$ ), tal i com queda manifest també als resultats presentats a l'epígraf 4.2.2.1. Segons el model, les màximes velocitats de vent (entre els  $5\text{-}5.6 \text{ ms}^{-1}$ ) es donen al marge superior de la morfologia situat a sotavent dels vents incidents de NNO, així com també en una franja del marge oriental. Endemés es veu com a la cresta de lòbul de deposició també es produeix un cert increment en la velocitat del flux. Si ens centrem en el propi *blowout* els marges superiors són els que experimenten les velocitats més elevades, oscil·lant al voltant dels  $4 \text{ ms}^{-1}$ , mentre que les mínimes es localitzen just a la part posterior de la *foredune* – abans de la boca del *blowout* – i al llarg dels primers metres del canal de deflació, amb velocitats que es situen al voltant dels  $0.5 \text{ ms}^{-1}$ , i que augmenten molt progressivament fins al lòbul de deposició. Aquest comportament es correspon amb el reflectit a l'epígraf 4.2.2.4., basat amb les dades empíriques recollides al llarg de l'experiment i representades a través del *Fractional speed-up ratio*. A la Figura 173 de l'epígraf esmentat es pot observar com les velocitats inferiors es troben també just a la part posterior de la *foredune* i que s'incrementen progressivament fins al lòbul deposicional. Finalment, remarcar de nou la diferència vers les velocitats registrades en ambdues parets, majors a l'oriental que a l'occidental deguda la seva major exposició als vents de NNO.

Si es limita l'anàlisi a la consideració de les línies de flux principals (Figura 187) es pot apreciar una considerable correlació amb alguns dels comportaments ja citats als paràgrafs anteriors. Un cop el flux ( $340^\circ$ ) arriba a la boca – *throat* – del *blowout* genera dos canals principals; en primer lloc un que es veu notablement condicionat per la pressió estàtica de les parets laterals, canalitzen-se al llarg de la canal de deflació i tenint com a via descompressió el marge superior del *blowout*, just a l'inici del lòbul deposicional. Es pot apreciar també com un cop aquest surt del *blowout* en sí recupera la direcció inicial NNO, reafirmant doncs el paper que té la topografia vers la modificació del flux. Un segona línia de flux és la que es dona a la paret oriental, a sotavent dels vents incidents. La seva major exposició fa que el flux eòlic prengui la paret est com a plataforma de descompressió, seguint també la direcció del flux inicial.

En segona instància fer esment al lleuger desajustament que el flux principal sofreix un cop aquest sobrepasa la boca – *throat* –. Tot i no ser possible detectar-hi fluxos secundaris ni tampoc patrons de turbulència significatius, si que es deixa intuir una lleugera heterogeneïtat, probablement associada a l'efecte topogràfic i a la pèrdua de pressió a la cara de sobrevent.



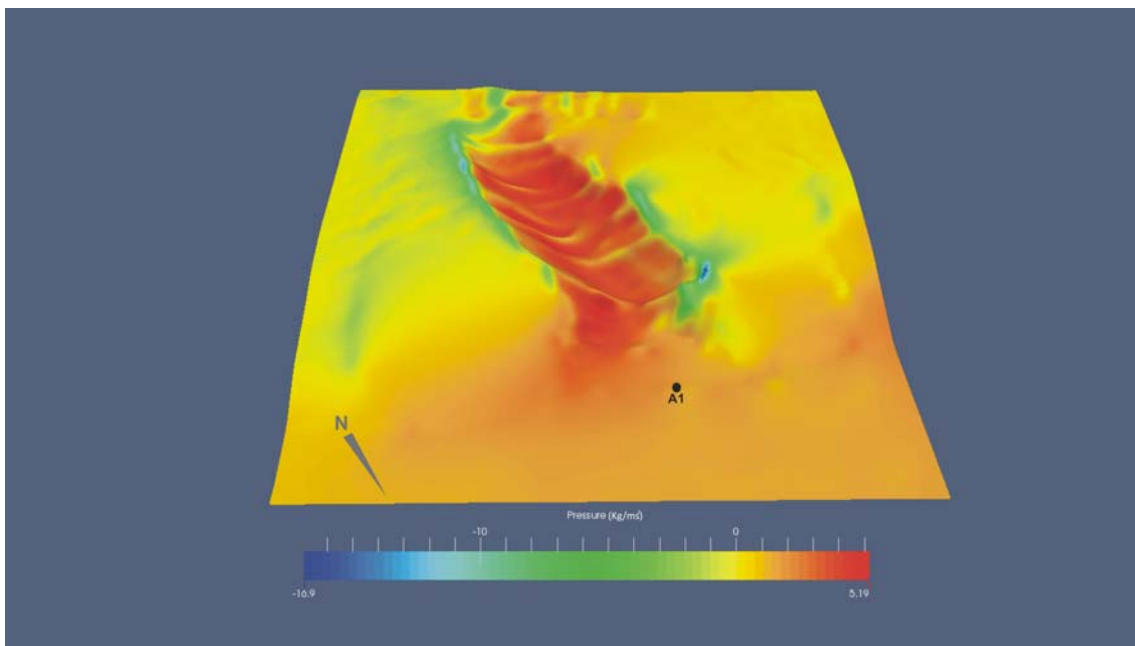
**Figura 187:** Simulació de les línies de flux eòlic principals a partir de vent de 340° representades a 1 m per a sobre de la superfície (situació d'estiu).

Si s'analitza la velocitat reflectida pels dos fluxos principals (Figura 187) la situació no és distant del que es comentava anteriorment, ni tampoc de les dades obtingudes de l'experiment al camp, mostrades també pel *Fractional speed-up ratio*, a l'epígraf 4.2.2.4. Centrant les consideracions al respecte a sobre del que es reflecteix amb el flux que es dona al llarg de la canal de deflació, es pot observar com les velocitats disminueixen una vegada sobrepassen la línia de *foredune*, i que després incrementen progressivament fins arribar als seus valors màxims, localitzats al marge superior de la rampa interior, just abans del lòbul de deposició. Un cop en aquest punt, i per la pèrdua de la pressió estàtica topogràfica, el flux s'expandeix i perd de nou velocitat.

Un dels fets que més pistes ens dona sobre la influència derivada de la força estàtica de la topografia, és el què succeeix amb la pressió exercida pel vent dintre del



*blowout*. Tal i com mostra la Figura 188 la major pressió del vent es localitza dintre de la morfologia, concretament al llarg de la canal de deflació i les parets laterals, amb valors que es situen al voltant dels  $5 \text{ kg/ms}^2$ . Si es contempla amb més perspectiva, la pressió del vent sobre el *blowout* es comença a iniciar poc abans de la seva boca – *trhoat* –, moment en que es comença a canalitzar (amb valors que oscil·len entre els  $2\text{-}4 \text{ kg/ms}^2$ ), i comença a decreïxer de nou un cop arriba al marge superior del *blowout*. En aquest punt es deixa veure doncs que la força estàtica i canalitzadora que suposen les parets deixa de tenir influència sobre el flux, el qual s'expandeix, perd velocitat (Figura 186), i també pressió (Figura 188).

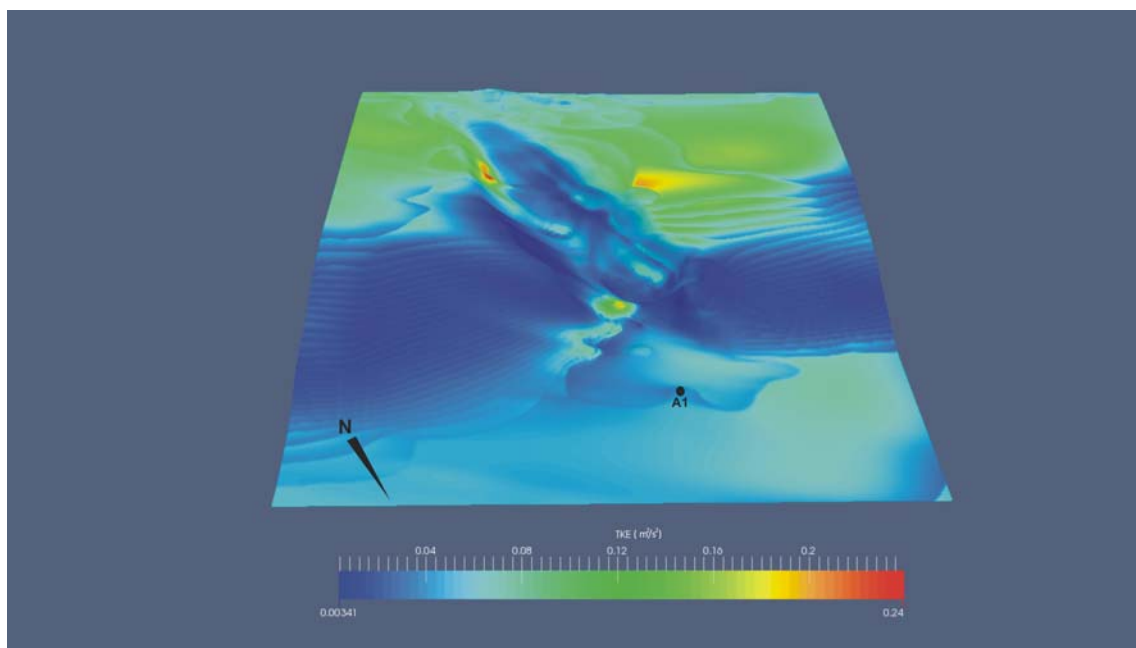


**Figura 188:** Model de la pressió del vent exercida sobre el *blowout* (situació d'estiu).

Les modelitzacions realitzades ens permeten determinar també la turbulència espacial del flux eòlic incident sobre la morfologia *blowout*, concretament a partir del model de turbulència k-Epsilon, basat en el número de Reynolds. En termes de dinàmica de fluxos es detecten turbulències quan el flux presenta, entre altres, canvis espacio-temporals ràpids de pressió i velocitat. A partir del càlcul de l'energia cinètica turbulenta (*TKE*; *Turbulent Kinetic Energy*), la qual es presenta com la mitja de l'energia cinètica per unitat de massa associada a un flux turbulent, es poden veure representades les zones a on, partint de la morfologia estudiada i sota les condicions de vents donades, la turbulència és superior.

La Figura 189 reflecteix la TKE de la situació estiuenca, sota baixes condicions energètiques. En termes generals, i degudes les baixes velocitats del vent incident, els nivells de turbulència són baixos. Els nivells més baixos es localitzen al front de dunes, just quan el flux incideix sobre el sistema dunar, amb valors que van entre els  $0.003 \text{ m}^2\text{s}^{-2}$  i els  $0.04 \text{ m}^2\text{s}^{-2}$ . El mateix grau de turbulència es localitza, a grans trets, dintre de la morfologia en sí, al llarg de la canal de deflació. Pel que fa a les zones de més turbulència destacar en primer lloc la part posterior a la *foredune* i als individus de vegetació herbàcia (e.g. *Ammophila arenaria*), just a la boca del *blowout*, amb valors que s'aproximen als  $0.2 \text{ m}^2\text{s}^{-2}$ . Si es compara amb la gràfica resultant de l'aplicació del *Fractional speed-up ratio* (Taula 58 i Figura 173 de l'epígraf 4.2.2.4.), la baixada i subseqüent pujada de la velocitat en aquest punt podria justificar certes turbulències en el flux, en part per un major grau de rugositat en el terreny.

Un segon punt amb mostres de turbulència, inclús superiors al comentat anteriorment, es troba al marge superior oriental, a l'altura de la rampa interior. En aquest cas es localitzen els valors màxims de la TKE, arribant als  $0.24 \text{ m}^2\text{s}^{-2}$ . Les explicacions per aquest cas es postulen més dificultoses, inclús si es compara amb els altres models comentats fins al moment. Sols com a apunt, aquesta zona coincideix amb un punt d'altres velocitats – dins l'escenari dibuixat sota la situació d'estiu – i de descompressió del flux per a sobre del marge superior. En tot cas, s'està parlant d'una situació no tant clara com l'anterior (Figura 189).



**Figura 189:** Model de turbulència del flux a partir de l'energia cinètica turbulenta (TKE; *Turbulent Kinetic Energy*). Situació d'estiu.

## 5.2. Models sota condicions d'energia mitjana-alta (hivern)

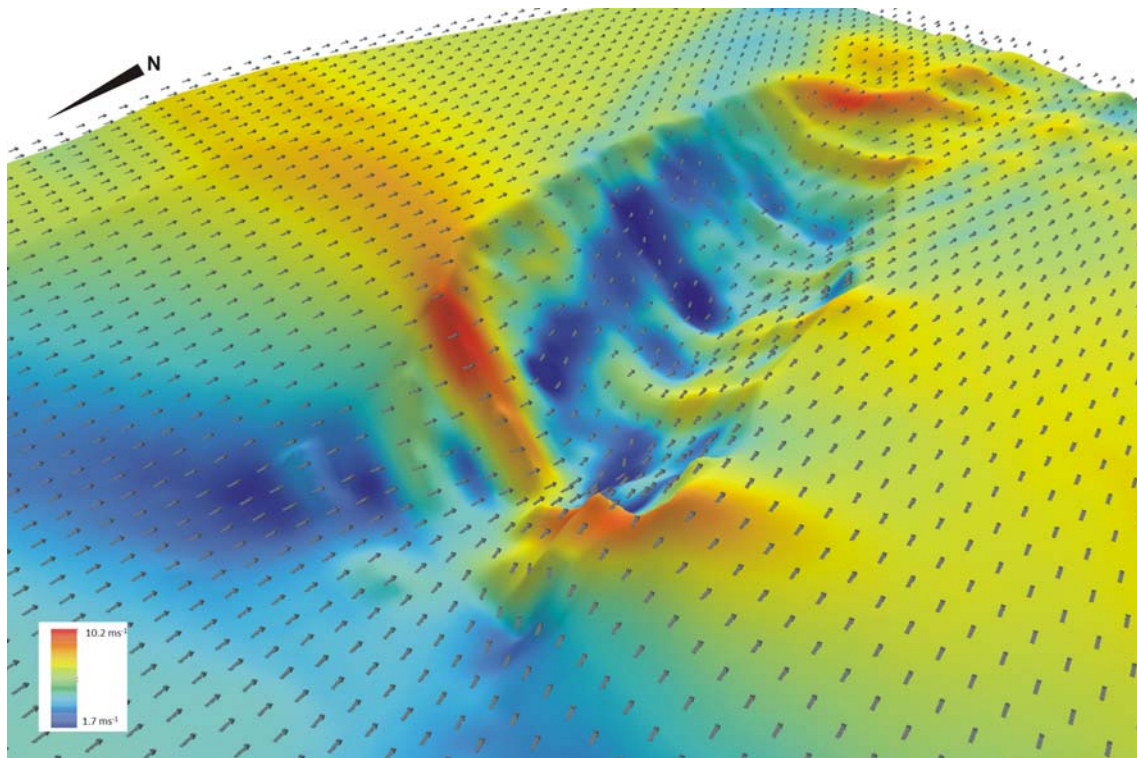
En aquest cas, els models que es presenten a continuació estan basats amb les condicions energètiques registrades per l'anemòmetre 1, emperò ara sota condicions energètiques mitjanes-altes. Les dades sobre les quals es modelitza el flux eòlic incident sobre el *blowout* són referents a la campanya de camp duta a terme entre els dies 17 i 18 de gener de 2013. De la mateixa manera que en el cas anterior, l'input inicial per a la modelització respon a les dades obtingudes per l'anemòmetre 1, localitzat al límit superior de la platja alta a 40 cm de la superfície. En el cas de la campanya hivernal es treballa amb una velocitat màxima mitjana de vent de  $5.7 \text{ ms}^{-1}$  i amb una direcció mitjana de  $350^\circ$ . Pel que es refereix al model de vectors i velocitats del flux, aquest ha estat dut a terme a partir de fletxes direccionals a 1 m de resolució i a 0.5 m per a sobre de la superfície.

### 5.2.1. Vectors, velocitat i línies de flux eòlic incident

La Figura 190 ens mostra de nou el comportament direccional del vent un cop aquest arriba al *blowout* analitzat. En aquest cas, tot i que les condicions energètiques siguin molt més elevades que en el cas anterior, sembla que els patrons direccionals esdevenen un tant més homogenis i senzills, principalment perquè la direcció del vent en aquest cas s'avé amb la pròpia orientació de la morfologia. Sigui com sigui, i si només ens fixem amb els patrons de direcció, es veu com el vent, un cop arriba a la boca del *blowout* – *throat* –, sofreix una important canalització la qual es mantén al llarg de tot la canal de deflació, fins arribar ja al lòbul de deposició, a on es tornarà a expandir.

Cabria fer esment a la relació que la direcció té en aquest cas amb la topografia i amb les intensitats de velocitat. La proximitat de les fletxes a la boca del *blowout*, en superfície, ens indiquen un bon exemple de la pressió exercida per la topografia, en aquest cas condicionada per un pas estret entre les dues parets. Tal disposició, i responent a l'efecte Venturi, suposa una canalització notable, acompanyada d'un increment en la velocitat del flux. D'aquesta manera es veu com just a la boca del *blowout*, i coincidint amb la canalització esmentada, se'n deriva un increment de la velocitat del vent, amb valors que parteixen dels  $8 \text{ ms}^{-1}$  i fins a sobrepassar els  $10 \text{ ms}^{-1}$ .

Seguint amb els patrons energètics, un cop el flux passa la boca del *blowout* perd velocitat de manera notable, arribant a valors d'entre  $1.5\text{-}2\text{ ms}^{-1}$ , i que després va recuperant fins a tornar a trobar-se amb els valors màxims al límit superior de la rampa interior, amb velocitats al voltant dels  $10\text{ ms}^{-1}$ . Finalment, un cop arribat al lòbul de deposició la velocitat disminueix de nou lleugerament, en part per haver perdut la pressió estàtica de les parets laterals.



**Figura 190:** Model de la velocitat i direcció del flux a 1 m per sobre de la superfície i sota una direcció de  $350^\circ$  a l'anemòmetre 1 (situació d'estiu). Les fletxes es troben separades en intervals de 2 m i indiquen la direcció del flux a 1 m per a sobre de la superfície, mentre que la coloració reflecteix la velocitat del mateix.

Precisament, el comportament del flux en aquest cas és força similar en ambdues parets, no obstant amb algunes apreciacions. La paret occidental sembla sofrir una major intensitat vers la canalització i pressió del flux, ja que les fletxes es troben més juntes que no en la paret oriental. La direcció es correspon amb la tònica general, i en aquest cas es dona de manera gairebé paral·lela a la pròpia orientació de la paret. Un cop el vent arriba a la part interior experimenta dues sortides de descompressió. Una que tendeix a al lòbul de deposició, i una segona, que es postula com a la més important per aquest cas, que es dona pel marge superior occidental. Pel que fa a la paret oriental,

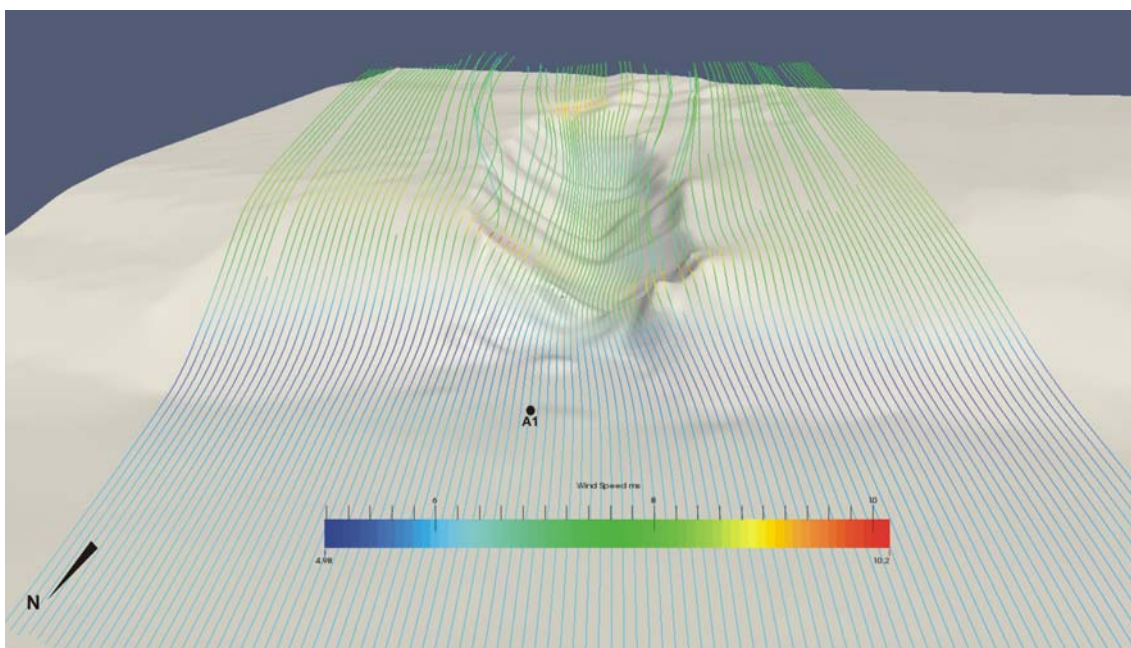
la major dispersió de les fletxes direccionals indica que la canalització i pressió de flux en aquest cas és lleugerament inferior. En aquest cas, tot i que els patrons de direcció siguin també paral·lels a l'orientació de la paret en els seus primers metres, es veu com la tendència canvia lleugerament a partir de la meitat, establint una direcció perpendicular a la pròpia paret i descomprimint per sobre del marge superior lateral. Les diferències entre ambdós casos també queden paleses si ens centrem amb la velocitat del flux. Com es veu, a la paret occidental, amb una major compressió del flux, les velocitats, al voltant dels  $7 \text{ ms}^{-1}$ , són superiors al cas contrari, amb valors que oscil·len entre els  $1.7\text{-}2 \text{ ms}^{-1}$ .

Els patrons de flux – tant en direcció com en velocitat – mantenen, a l'igual que en el cas anterior, una certa relació amb els obtinguts a l'experiment de camp (epígraf 4.2.3.3.). Si ens centrem amb el model de direcció eòlica es pot observar com la relació és notable entre les dues modelitzacions. En l'experiment de camp, mostrat per la Figura 177 de l'epígraf mencionat, es veu una disposició de les fletxes força similar al cas comentant en aquest apartat. Així, un cop el flux arriba a la boca del *blowout* sofreix una canalització provocada per les mateixes parets (responent també a l'efecte Venturi), i que s'estén fins arribar al lòbul de deposició, moment en que s'expandeix de nou. La similitud es percep considerable, també, si s'observa amb l'escenari dibuixat a la paret occidental, ja que en ambdós casos la direcció del vent es presenta paral·lela a l'orientació de la paret lateral. El cas que dista més és el de la paret oriental, tot i que mantenint també similituds apreciables. En aquest cas la direcció perpendicular del vent a l'orientació de la paret lateral es dibuixa molt més marcada en el cas de l'experiment de camp (Figura 177, epígraf 4.2.3.3.). La justificació a tal diferència sembla ser clara. En el cas del model obtingut del mostreig *in situ* al camp les dades provenen directament de l'anemòmetre 6, situat just a la meitat de la paret, i el qual ens indica una clara direccionalitat eòlica de component W-SW (Figura 175, epígraf 4.2.3.2.). No obstant, en el cas del model CFD les dades no deixen de ser una extrapolació de la interacció del vent, partint de les condicions inicials (anemòmetre 1), i la seva interacció amb la topografia existent. Així i tot, i com ja s'ha comentat, en aquest cas també es veu una clara tendència perpendicular, sobretot en la segona meitat de la paret.

A mode d'apunt, i per a completar la comparació, els resultats del model CFD ajuden a reafirmar i justificar els distints comportament sedimentaris entre ambdues parets, ja comentats a partir de la situació en camp a l'epígraf 4.2.6.1. (veure també Figura 177, epígraf 4.2.3.3.). Atenent per tant els escenaris dibuixats en aquest darrer

cas, la intensificació energètica del flux en el cas de la paret occidental i la seva direcció paral·lela a l'orientació de la mateixa ajuden de nou a explicar la tendència seguida pel sediment, i el producte final de l'erosió laminar. D'altra banda, tot i que amb menor mesura, en el cas de la paret oriental, amb una incidència perpendicular del flux, les esllavissades sedimentàries – *sandfalls* – per gravetat també en queden justificades.

Els patrons de direcció comentats fins al moment certament es corresponen amb la tendència dibuixada per les línies de flux principals (Figura 191). Com ja s'ha esmentat, la direcció del vents principals en el cas de l'experiment hivernal es correlaciona notablement amb l'orientació de la morfologia. Aquest és un factor important a l'hora d'explicar el comportament que segueix el flux un cop s'insereix dintre del *blowout*. Tal i com mostra la Figura 191, cal fer una diferenciació entre; a) canal de deflació i, b) parets laterals. En el primer cas torna a quedar palesa la notable canalització i uniformitat que assoleix el flux, mentre que en el segon dels casos aquest sembla perdre pressió alhora que també assoleix una major heterogeneïtat.



**Figura 191:** Simulació de les línies de flux eòlic principals a partir de vent de 350° representades a 1 m per a sobre de la superfície (situació d'hivern).

Una altra vegada la Figura 191 ens serveix per a contemplar les diferències direccionals del flux entre ambdues parets laterals. De nou es contempla com en la paret occidental el flux principal es desenvolupa paral·lel a la orientació de la mateixa,

mentre que en el cas de l'oriental, sobretot a la part alta, es contempla com a perpendicular.

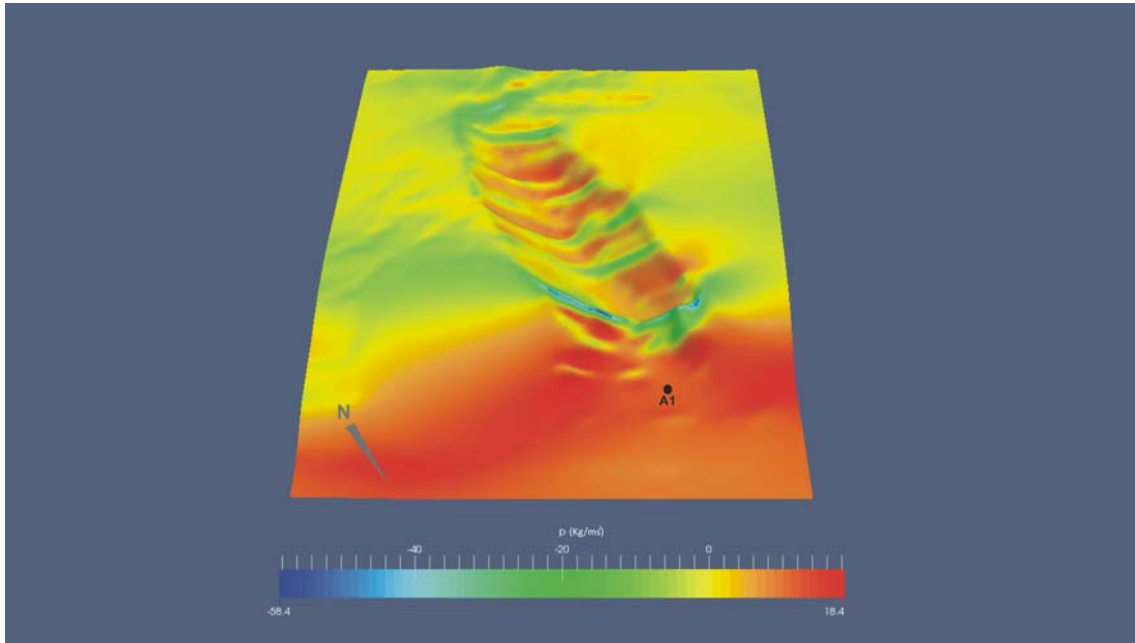
La variable velocitat apareix de nou amb una correlació positiva amb les tendències comentades fins al moment, també entre el model analògic i l'experiment de camp. S'observa que les màximes velocitats s'assoleixen a la boca del *blowout*, moment en que el flux es veu considerablement canalitzat (efecte Venturi), i al límit superior de la rampa interior, com a resultat de la canalització i increment progressiu de la velocitat al llarg de la canal de deflació. De fet aquest increment queda reflectit també a la Figura 190, a l'igual que la disminució de la velocitat un cop el vent supera el lòbul de deposició i perd el control canalitzador exercit per la morfologia en sí.

La incidència perpendicular dels vents principals sobre la línia de costa i primera duna fa que la màxima pressió eòlica exercida es localitzi, en aquest cas, sobre aquesta primera franja. Les altes condicions energètiques experimentades al llarg del treball de camp ja deixaven preveure que el vent bufava a gran velocitat fins a topar-se amb el sistema dunar en sí que, degut a l'efecte pantalla, dissipava el flux. Aquest fet queda manifest a la Figura 192, a on es veu com la màxima pressió es troba a primera línia, arribant a valors de  $18.4 \text{ kg/ms}^2$ . Amb aquest escenari queda demostrat que sota condicions energètiques considerables, com en pot ser el cas, la primera línia de duna és la franja més vulnerable a sofrir processos erosius. A aquest punt el vent hi arriba amb condicions "verges", sense abans haver estat modificat ni condicionat per cap element. Tal fet suposa que la primera franja dunar esdevingui el primer efecte pantalla, assumint així el impacte del flux eòlic sota una pressió considerable.

Tot i que amb menor intensitat, la pressió eòlica dintre de la morfologia segueix sent considerable. Cal dir i repetir de nou que, amb les condicions energètiques sota les quals s'analitza la situació d'hivern, la pressió era estesa arreu. Tornat al *blowout*, es veu com a la cubeta de deflació la pressió, tot i variable, assumeix valors notables, arribant inclús als  $18 \text{ kg/ms}^2$ . No obstant, i si es compara amb la gradació, queden manifestes variacions i oscil·lacions molt considerables, en part atribuïbles a la morfologia interna i a la rugositat superficial associada. Així es passen de valors màxims a altres que es mouen entorn als  $-20 \text{ kg/ms}^2$ .

Finalment, la pressió del vent un cop aquest arriba i supera el lòbul de deposició es veu notablement disminuïda, amb valors que es mouen una altra vegada entorn als  $-20 \text{ kg/ms}^2$ . Aquest fet de nou es relaciona amb la pèrdua de la pressió estàtica que les parets laterals exerceixen sobre el flux dins del *blowout*, i que si es relaciona amb el

comportament derivat de l'aplicació del *Fractional speed-up ratio* (veure Figura xx, epígraf 4.2.3.4.), també ho fa amb la manifesta pèrdua de velocitat soferta en aquest punt.



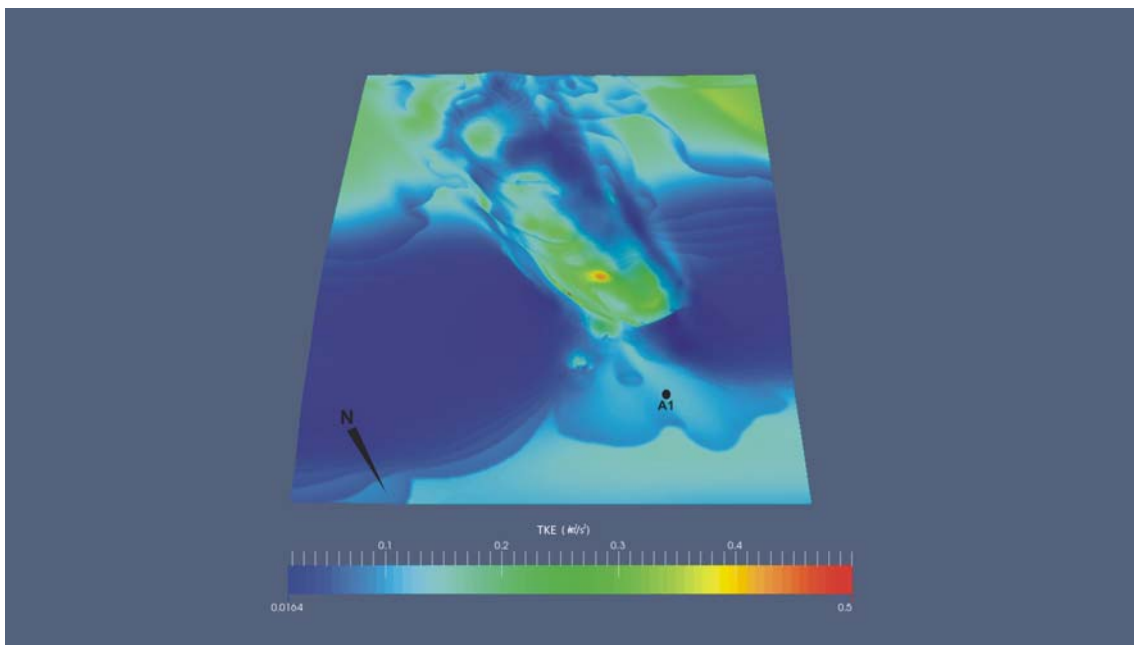
**Figura 192:** Model de la pressió del vent exercida sobre el *blowout* (situació d'hivern).

Per acabar la caracterització vers a la pressió del vent, la comparativa entre els models referents a les dues situacions energètiques, estiu i hivern, en suggereix alguns comentaris. Tot indica que sota condicions energètiques baixes, amb velocitats suaus del vent en primera línia, les màximes pressions es donen al llarg de la cubeta de deflació, en part per l'efecte canalitzador de la topografia i per l'augment progressiu de la velocitat del flux. No obstant, l'escenari canvia substancialment si es parla de condicions energètiques inicialment elevades, les quals al no estar interferides abans, el primer element amb que es topen és la primera línia de duna, impactant amb força i dissipant-se a continuació.

A tal efecte sembla doncs que la velocitat del vent no té perquè anar relacionada amb la distribució espacial de la pressió exercida pel mateix. En el primer cas és el control de la topografia del *blowout* qui condiciona els patrons de pressió i la localització de les màximes, mentre que en el segon escenari agafa pes el fet de que les condicions energètiques arriben a la primera línia sense abans haver estat condicionades per cap element.



Finalment, si s'entra a valorar el nivell de turbulència a partir del model de l'energia cinètica turbulenta (TKE) (Figura 193), la situació es presenta més significativa que no la tractada a l'epígraf anterior, sota situacions energètiques de calma. En aquest cas, i com ja es donava en el cas anterior, la turbulència del flux un cop aquest arriba a la primera línia de duna es mínima, ara amb valors entre 0.0164 i 0.1  $\text{m}^2\text{s}^{-2}$ . Sota condicions energètiques mitjanes-altes la turbulència comença a incrementar-se un cop el flux supera la primera línia de *foredune* i vegetació, i un cop es canalitza a través de la boca del *blowout*, amb valors que oscil·len entre els 0.1 i 0.15  $\text{m}^2\text{s}^{-2}$ . Els màxims graus de turbulència els trobem just a l'inici del canal de deflació, després de que el flux hagi sobrepassat el *trhoat*, mostrant valors entorn als 0.3  $\text{m}^2\text{s}^{-2}$  – aquests valors s'estenen gairebé al llarg de tot el canal de deflació –, i arribant als màxims de 0.5  $\text{m}^2\text{s}^{-2}$ . En termes generals, i per concloure, la rugositat existent a la primera línia, marcada per la presència de *echo-dunes* i vegetació herbàcia, condiciona la divergència del flux, canvis en la seva pressió i velocitat, i conseqüentment també, una major turbulència un cop aquest entre dins del *blowout* en sí.



**Figura 193:** Model de turbulència del flux a partir de l'energia cinètica turbulenta (TKE; *Turbulent Kinetic Energy*). Situació d'hivern.

### 5.3. Anàlisi comparativa entre els models CFD i els experiments de camp

Els models CFD s'introdueixen avui dia dins el marc científic costaner com una eina amb un futur prometedor, no sols pel que suposa l'estudi i la interpretació de la dinàmica eòlica donada en un emplaçament en particular sota unes certes condicions energètiques, sinó també com a plataforma per a simular escenaris futurs. Partint d'aquesta premissa la seva utilitat recau, no sols en verificar processos eòlics basats sobre dades reals, sinó també a postular-se com a una vertadera eina de gestió costanera.

Sigui dit per endavant però, que aquests no deixen de ser simulacions fetes sobre unes certes característiques atorgades – geomorfològiques i energètiques, en el nostre cas – que a vegades poden distar, o si més no obviar, fets tangibles a la realitat. Dintre d'aquest escenari, avui encara falten certs elements a incorporar per a tal de que aquestes modelitzacions abordin amb més precisió la realitat que pretenen simular. En aquest sentit, el present apartat es postula amb un cert esperit constructiu vers a tal propòsit, ja que de la comparació entre els experiments en camp i els resultats obtinguts dels models CFD se n'han detectat alguns aspectes que cap comentar.

Els resultats obtinguts en ambdós casos ens permeten establir certes comparacions pel que respecte a la direccionalitat del flux un cop aquest entre dintre de la morfologia per una banda, i a la velocitat del vent per una altra. En el primer cas, en termes generals existeix una certa correlació entre els dos models (els CFD i els obtinguts a partir dels experiments de camp) tant en la situació de baixa energia com la referent a condicions mitjanes-altes. Cap destacar la coincidència en la que els dos casos incideixen; a) la canalització del flux un cop aquest s'endinsa al llarg de la cubeta de deflació, i b) la seva divergència un cop aquest arriba al lòbul de deposició i perd la pressió estàtica de la topografia. Aquest fet coincideix de ple amb el que altres autors tals com Smyth et al. (2012) postulen, reafirmant tot junt el paper i la importància que juga la topografia vers al comportament eòlic a sobre sistemes dunars.

Si bé en termes generals, pel que fa a direcció, hi ha certes coincidències, si l'anàlisi es fa més al detall apareixen alguns aspectes interessants. Amb aquest sentit cap dir que els models CFD, basats íntegrament amb l'efecte de la topografia, permeten acotar amb més precisió alguns processos. Tant amb la situació d'hivern (Figura xx) com sobretot a la situació d'estiu (Figura xx) aquests permeten veure moviments de reflux o fluxos secundaris, especialment destacables un cop aquest sobrepassa la boca del *blowout – troath* –, just a la part del *lee* o sobrevent. Si ens hi fixem aquest fet és

més difícilment identificable en el cas dels models obtinguts directament a partir dels experiments de camp (Figura xx i Figuraxx). Amb aquest sentit, tal i com ja era comentat a l'epígraf 1.8.3., la importància dels models CFD agafa magnitud posat a que avui dia gran part de l'interès científic passa per a caracteritzar el fluxos secundaris donats al *lee* de les morfologies dunars, i en segon instància, per veure quins en poden ser els seus efectes geomorfològics.

D'altra banda, el model CFD, concretament el referent a la situació de baixa energia (Figura xx), permet veure que sota les condicions eòliques donades es produeix una zona de descompressió del flux per a sobre del marge lateral oriental, fet que no es percep en el model resultant de l'experiment en camp (Figura xx).

Tot i que en termes generals es podria afirmar que els dos models contemplen una notable similitud, el CFD en aquest cas permet percebre alguns processos que recalquen interès. Sent aquest un model basat íntegrament amb el comportament que el flux adopta un cop topa amb la topografia, permet doncs veure a petita escala moviments que sota extrapolacions més genèriques no es deixen intuir. És així doncs que autors com Hesp i Walker (2012) o Smyth et al. (2012) insisteixen en recalcar la seva funcionalitat si el que es vol és conèixer bé com funciona la dinàmica eòlica en *blowouts*. Al ser aquests morfologies irregulars, amb presència de parts a sotavent (*stoss*) i sobrevent (*lee*), és important articular noves tècniques que ajudin a la interpretació d'aquests fluxos secundaris. En aquest sentit els CFD, junt amb la utilització d'anemòmetres ultrasònics 3D, es postulen com als mètodes actuals més aptes avui dia.

Si pel que fa als patrons direccionals els dos models mantenen coincidències significatives, aquestes disten lleugerament si s'aborden les similituds entre les velocitats del vent. Comparant la distribució de les velocitats enregistrades al camp i les simulades pels models CFD es notifiquen algunes diferències a tenir en compte. Començant per la situació d'estiu, l'experiment en camp, a partir del *Fractional speed-up ratio* (Figura xx de l'epígraf 4.2.2.4.), ens dóna que partint d'una situació inicial d'input (anem.1), la velocitat del vent disminueix a l'anemòmetre 2 un cop sobrepassa la primera línia de dunes embrionàries ( $\delta s \chi = -0.91$ ) per a després remuntar la seva velocitat progressivament a l'anem. 3 ( $\delta s \chi = -0.33$ ) i arribar al seu màxim a l'anem. 4 ( $\delta s \chi = 0.50$ ) i anem. 5 ( $\delta s \chi = 0.90$ ), aquest darrer situat al marge superior del *blowout*, a l'inici del lòbul de deposició. Si ens centrem en valorar el resultat del CFD (Figura xx

de l'epígraf 5.1.1.) es veu com el màxim de velocitat coincideix també al límit superior del *blowout*, no obstant no es percep d'igual manera l'acceleració progressiva de la velocitat al llarg de la cubeta de deflació. En aquest cas la tendència mostrada es caracteritza per velocitats baixes i sostingudes. Finalment, pel que fa a les parets laterals també hi ha un aspecte a comentar. En el cas del CFD les velocitats registrades a la paret oest (entre  $0.5-1 \text{ ms}^{-1}$ ), situada a sobrevent, són lleugerament inferiors a les velocitats mostrades a la paret oriental (al voltant de  $2 \text{ ms}^{-1}$ ), en aquest cas a sotavent del flux incident. Aquest fet sembla lògic si pensem que la incidència del vent, deguda la seva direcció, és més elevada en el cas de la paret oriental. No obstant la situació canvia lleugerament en el cas experimentat al camp. Si ens fixem amb les dades de la Taula xx (epígraf 4.2.2.1.), la velocitat mitjana a l'anemòmetre 7 ( $4.2 \text{ ms}^{-1}$ ), situat a la paret oest, és superior a la registrada per l'anemòmetre 6 ( $2.3 \text{ ms}^{-1}$ ), situat a la paret oriental. Aquesta relació doncs canvia la situació mostrada pels model CFD.

Pel que fa al cas mostrat sota condicions energètiques mitjanes-altes (hivern) les diferències entre ambdós models disminueixen, tot i ser encara apreciables. Al igual, el model de camp ens torna indicar un increment progressiu de la velocitat del vent al llarg de la cubeta de deflació un cop aquest ha superat la primera línia de dunes, arribant als seus màxims a la rampa interior i al marge superior del *blowout* (Figura xx de l'epígraf 4.2.3.4.). El model CFD mostra en certa manera la mateixa situació. Amb una velocitat al voltant dels  $2-3 \text{ ms}^{-1}$  a la zona d'input, aquestes disminueixen un cop sobrepassen la primera línia de dunes per incrementar-se progressivament al llarg del canal de deflació i arribar als seus màxims al marge superior del *blowout*, amb valors propers als  $10 \text{ ms}^{-1}$ . Pel que fa a les parets laterals en aquest cas sí s'aprecia una coincidència entre els dos models. En el CFD les velocitats més elevades es donen a la paret occidental (entorn als  $6 \text{ ms}^{-1}$ ), al igual que ocorre al model de camp, a on la velocitat mitja de l'anemòmetre 7 – situat a la mateixa paret – es situa en  $5.4 \text{ ms}^{-1}$  (Taula xx de l'epígraf 4.2.3.1.). Respecte a la paret oriental, el model CFD indica una velocitat al voltant dels  $2 \text{ ms}^{-1}$ , mentre que en el model experimental, registrada per l'anemòmetre 6, aquesta es situa als  $4.8 \text{ ms}^{-1}$ .

Per acabar amb la comparativa, en aquest darrer cas el CFD ens permet contemplar una situació, com a mínim, interessant. Aquesta passa per el increment de la velocitat un cop el flux es canalitza per la boca del *blowout*, arribant també a velocitats properes als  $10 \text{ ms}^{-1}$ , explicant de nou la importància de la topografia vers al comportament eòlic dins sistemes dunars. En aquesta tessitura, aquest model permet

verificar l'efecte Venturi també en *blowouts*, responant així a que la canalització del flux sotmesa a la pressió estàtica de la topografia suposa un increment considerable de la seva velocitat.

A grans trets es pot concloure que els dos models no disten amb excés des del punt de vista direccional, no obstant sí incrementen les seves diferències si ens centrem amb l'anàlisi de la velocitat del flux. En el primer cas el que es representa al cap i a la fi és el comportament del vent sobre una mateixa topografia, fet que ajuda a pensar en que les diferències no siguin tant notables. En certa manera les condicions inicials del vent un cop entre dintre del *blowout* són les mateixes. En el segon cas cap pensar que les diferències entre els dos models es poden deure en gran part a la cobertura espacial dels punts de mostreig. Els models CFD estan basats únicament amb les condicions de vent enregistrades per l'anemòmetre 1, mentre que el model experimental de camp es basa amb les dades dels 7 anemòmetres utilitzats, incrementant així la cobertura espacial mostrejada. Sense entrar en valorar la qualitat intrínseca de cada resultat, sembla lògic pensar que l'experiment en camp proporciona unes dades més acurades i representatives que no el model CFD.

A mode de conclusió, i des d'una postura constructiva, dues en són les consideracions que es volen fer amb la present tesi per a tal de que els models CFD abordin de la manera més aproximada possible la realitat sobre el comportament del flux eòlic sobre sistemes dunars;

- a) El fet de sols utilitzar un input de vent disminueix la precisió i la cobertura espacial de les dades energètiques sobre les quals es basa el model. Així, la possibilitat de modelitzar el comportament del flux dintre morfologies *blowout* sent capaç d'establir diferents punts de control ajudaria a incrementar la precisió del resultat aproximant-lo encara de manera més nítida a la realitat.
- b) Com ja s'ha reflectit en diverses ocasions, els sistemes dunars són ambients molt complexos des del punt de vista físic, condicionats alhora per moltes variables. Les topografies dunars, per norma general – a no ser que es tracti de sistemes totalment lliures des d'un punt de vista sedimentari –, no compten amb superfícies lliures i homogènies, sinó que es caracteritzen per zones de més rugositat (per exemple per la presència de vegetació) o zones a on es característiques físiques de l'arena són

diferents (zones més ombrívoles i per tant més humides). En aquest sentit seria interessant que les modelitzacions CFD tinguessin la capacitat d'incorporar en els seus anàlisis variables tals com presència de vegetació o humitat de l'arena a fi d'acotar amb major exactitud les condicions reals del sistema que es presenten modelitzar.



# Capítol 6

---

**Si els fets no encaixen amb la teoria, canvia els fets**  
*(Albert Einstein)*

Consideracions per a la  
gestió dels sistemes dunars a  
partir de la intervenció en  
*blowouts*





**CAPÍTOL 6 CONSIDERACIONS PER A LA GESTIÓ DELS SISTEMES DUNARS A PARTIR DE LA INTERVENCIÓ EN *BLOWOUTS***

Ja arribant al final de la present tesi, i després dels capítols que antecedeixen al que comença, comptem amb un seguit de mostres empíriques que ens permeten pensar amb mesures de gestió que ajudin a millorar l'estat de conservació dels sistemes dunars a les Illes Balears, principalment a partir de la intervenció al llarg de la primera línia de duna, i més concretament en les morfologies *blowout* existents.

El capítol 3, centrat amb la part més descriptiva dels *blowouts* dels sistemes analitzats, ens posa de manifest la recurrència d'aquestes morfologies, així com també ens permet relacionar-les amb estats de conservació notablement millorables. Ens dona pistes endemés de que seria un error només considerar dites morfologies des d'una perspectiva individual, tot indicant que la valoració ha de ser integrada. De les anàlisis i mostres duts a terme s'està ara en condicions de pensar amb mesures de gestió basades i centrades amb variables ecològiques i geomorfològiques, i en definitiva, que parteixin de la naturalesa intrínseca d'aquests ambients.

En el capítol 4 s'ha donat una passa més. Si bé la definició i caracterització dels *blowouts* en sistemes de Mallorca i Menorca ja estava coberta, aquest capítol centra els seus esforços en endinsar-se a millorar el coneixement sobre la dinàmica eòlica i sedimentària que segueixen les morfologies *blowouts*, concretament a partir de dos casos d'estudi; es Comú de Muro (Mallorca), i Cala Tirant (Menorca). Si bé es pensava, fins al moment, que la presència de *blowouts* en primera línia era un fet negatiu per a la conservació integral dels sistemes dunars a emplaçaments com les Illes Balears, cap n'era l'antecedent que dedicava els seus esforços a quantificar tal fenomen. En aquest sentit, l'aplicació metodològica i experimental mostrada i explicada per l'esmentat capítol ens posa a sobre la taula la magnitud quantitativa dels processos d'erosió i sedimentació que es donen al llarg d'alguns *blowouts*, situats a la primera línia dels sistemes, i partint de situacions energètiques diferents. Aquest escenari ens permet aportar, a partir d'informació objectiva i empírica, algunes consideracions vers a la gestió d'aquests ambients enfocades a la mitigació dels problemes d'erosió derivats o potencials.

Finalment, el capítol 5 introdueix també un concepte metodològic completament nou dins els estudis de geomorfologia litoral a les Balears i, també, a la resta de l'Estat.

Les modelitzacions CFD permeten doncs aproximar-nos d'una manera precisa al comportament que el flux eòlic incident té un cop aquest s'endinsa dintre de les morfologies *blowout*, permetent establir patrons energètics que ajudaran a la presa de decisions sobre possibles mesures de gestió.

Amb tot, el present capítol es postula amb l'objectiu de fer esment a algunes consideracions derivades de les observacions dutes a terme en aquest treball. Tot i que la tesi no hagi centrat els seus esforços en demostrar l'eficiència de mesures de gestió a partir de la seva aplicació, monitorització i seguiment, sí que els resultats obtinguts, sobretot dels experiment en camp, ens donen bases sòlides per a interpretar i suggerir l'eficiència positiva que algunes mesures podrien tenir vers a la millora de l'estat de conservació geomorfològica i ecològica dels sistemes dunars.

## 6.1. Mesures de gestió generals

La tasca de caracterització i descripció de les morfologies *blowout* presents en alguns sistemes dunars de Mallorca i Menorca ens permet pensar en algunes mesures de gestió que, en termes genèrics, podrien ajudar a millorar l'estat de conservació de la primera línia, però també de tot el sistema en la seva integritat. Aquestes són:

- Tractament integrat de les morfologies *blowout*

Alguns dels sistemes estudiats, com n'és el cas d'es Comú de Muro, Mallorca (veure apartat 3.1.1.), deixen força clar que el màxim risc d'erosió i degradació no el trobem en els *blowouts* simples, sinó en la sinèrgia potencial que hi pot haver vers a la coalescència de distintes morfologies inicialment diferents. El model evolutiu postulat a l'epígraf 1.6.2. (Figura 16) mostra com la no intervenció de *blowouts* des del seu estat inicial pot ajudar al seu creixement espacial i, en conseqüència, a la seva coalescència amb morfologies limítrofes tot incrementat l'estat de fragmentació i degradació (veure exemples de fragmentació a la Figura 73 de l'epígraf 3.1.1.2.4.).

La gestió de les morfologies *blowout* vers les seves possibles conseqüències sedimentàries i dinàmiques sembla estar condicionada per la situació socioeconòmica de la zona d'estudi. En aquesta tessitura estudis recents promouen la creació de noves

morfologies *blowouts* per tal de reactivar els sistemes dunars des del punt de vista sedimentari, i fer-los més dinàmics i actius (Barchyn i Hugenholtz, 2012; 2013) (veure més a l'apartat 1.6.4.).

Els patrons evolutius observats per la present tesi posen de manifest que l'evolució temporal d'aquestes morfologies pot resultar amb un increment de les seves dimensions, i per tant, amb un major risc d'erosió sedimentària des de la platja alta cap a l'interior del sistema. Tenint en compte la problemàtica existent en la majoria de platges de les Balears, amb dèficits sedimentaris sobre la platja emergida, es proposa intervenir les morfologies *blowout* des dels seus estats inicials i des d'una perspectiva integrada, ajudant alhora a la recuperació d'una primera línia de duna o *foredune* efectiva des del punt de vista de retenció sedimentària, evitant així balanços negatius i erosius.

- Intervenció sobre la primera línia de duna

Les anàlisis espai-temps dutes a terme als sistemes de Cala Agulla (epígraf 3.1.2.1.2.), Cala Mesquida (epígraf 3.1.3.2.) i s'Olla (epígraf 3.2.3.2.) donen clars indicis de la importància que té la primera línia de duna vers l'estat de conservació de tot el sistema en general. En els tres casos es postula una notable relació entre l'estat de conservació de la primera línia i els patrons erosius del sistema. En aquest binomi, una estat degradat de la primera línia du en sí problemes d'erosió per a la resta del sistema, sobretot pel que fa als sectors més dinàmics, encara actius en els balanços sedimentaris – e.g. sector de dunes mòbils o semi-estabilitzades –.

Per a parlar d'exemples en concret, les anàlisis realitzades constaten que el front de Cala Agulla ha retrocedit, en termes mitjans, de l'ordre de 10-20 m al llarg del darrers 54 anys. Fer esment especial a la relació que en aquest cas es mostra entre les zones més erosionades i aquelles que esdevenen més freqüentades, coincidint també amb les entrades principals a la platja per part dels usuaris. En algun d'aquests punts el retrocés ha arribat a superar els 120 m. Pel que fa al cas de Cala Mesquida, el seu front dunar, en el període 1956-2010, ha retrocedit una mitja de 20.13 m, amb una tendència de -0.37 m/any. En aquest cas, els sectors de dunes davanteres més castigades han ajudat a una reactivació sedimentària integral del sistema provocant, entre altres coses, la dinamització i avanç dels lòbuls de deposició interiors – *blowouts* –. Si seguim parlant amb termes mitjans, el cas de s'Olla (Menorca) és el que ha experimentat un

major retrocés, en aquest cas entre 1956-2012, materialitzat en 33.48 m, i amb una taxa de -0.6 m/any.

Cada un dels casos exposats ens manifesta que, des d'una perspectiva integradora, és més que necessari mantenir cura de l'estat de conservació de la primera línia de duna, ja que sens dubte és aquesta la que ens controlarà el dinamisme i la mecànica del sistema. En aquesta tessitura, i a nivell general, els resultats obtinguts ens inciten a proposar una intervenció blana i efectiva sobre aquells sistemes que comptin amb una primera línia degradada o inexistent. La millora passarà per establir mecanismes d'interferència sedimentària – e.g. trampes de retenció – per a potenciar l'acumulació de sediment, la formació de morfologies efímeres, i la seva fixació i evolució a partir del creixement de vegetació, en aquest cas principalment herbàcia.

- La importància de la vegetació com a mesura efectiva de gestió

La darrera de les mesures de gestió generals passaria per remarcar el paper que la vegetació pot arribar a tenir en tant a l'estat de conservació dels sistemes dunars, principalment del seu front (Ley, 2012). Els inventaris florístics duts a terme en varis dels sistemes estudiats per aquesta tesi (es Comú de Muro, epígraf 3.1.1.2.6.; Cala Agulla, epígraf 3.1.2.2.6.; Cala Tirant, epígraf 3.2.1.2.5.; La Vall, epígraf 3.2.2.2.5.) remarquen el paper que, sobretot algunes espècies – e.g. *Ammophila arenaria*, *Pancratium maritimum*, etc. –, tenen vers a la retenció sedimentària en primera línia. Endemés, les anàlisis espai-temps realitzades suggereixen que per haver-hi una recuperació geomorfològica de la primera franja dunar, primer s'ha de donar una proliferació de la cobertura vegetal. Un bon exemple del dit queda reflectit en el cas de s'Olla (Menorca), sobretot a partir de 2002. El creixement de vegetació herbàcia en primera línia, principalment al sector oriental de la platja, suposà una millora substancial de la primera línia de dunes, facilitant la formació d'una línia de *foredune* sòlida (veure més a l'epígraf 3.2.3.2.).

Partint del marc teòric i empíric, cap proposar tenir esment a l'estat de conservació ecològica en sistemes dunars. És important mantenir una cobertura vegetal sòlida en primera línia, fet que ajudar a incrementar els patrons de retenció sedimentària – i per tant la formació de noves morfologies arenoses –, disminuir les taxes erosives des de la platja alta cap a l'interior del sistema, i dissipar l'energia del vent incident a conseqüència de l'increment en la rugositat superficial.

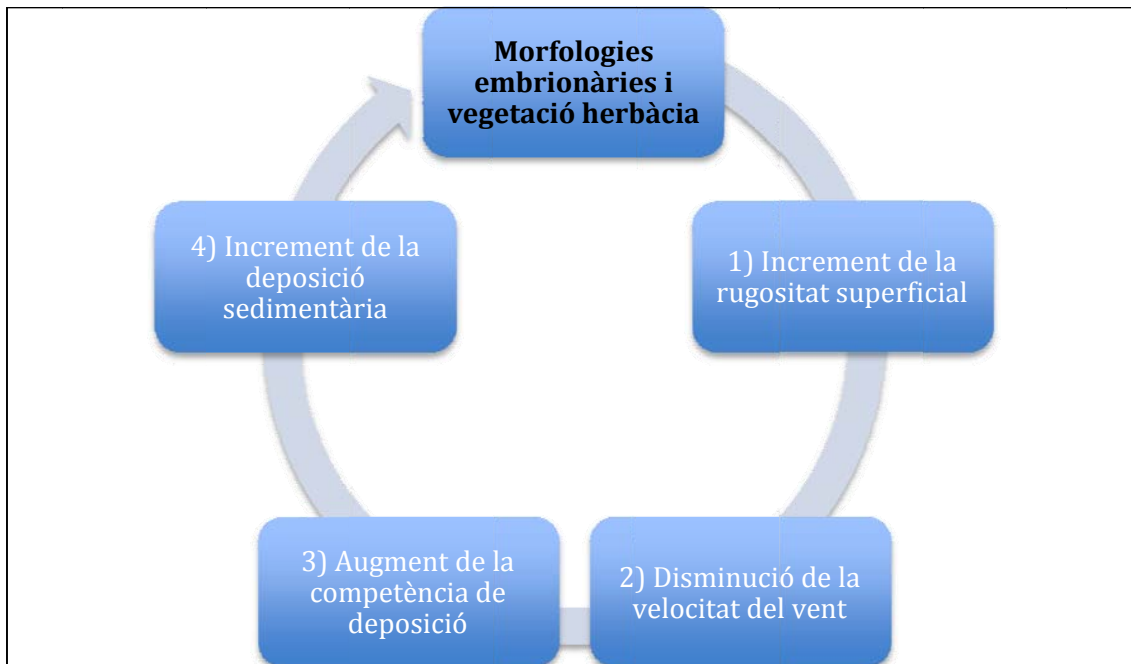
## 6.2. Mesures de gestió específiques

La part experimental de la tesi, desenvolupada i explicada principalment al capítol 4, ens ha permès aproximar-nos a la consideració d'algunes mesures de gestió que podrien ser potencialment positives en tant a l'estat de conservació dels fronts dunars, així com vers a la recuperació i estabilització de les formes erosives *blowouts* existents. L'estudi i anàlisi de la dinàmica eòlica i sedimentària en morfologies *blowouts* ens dona un major coneixement dels processos i agents que interactuen en aquests ambients, facilitant alhora signes empírics que ens donen arguments per a pensar amb mesures de gestió, ara, a menor a escala.

- La importància de les morfologies arenoses embrionàries i la vegetació psammòfila

Si als paràgrafs anteriors ja es comentava la importància que una bon cobertura vegetal té vers al control dinàmic dels sistemes dunars, els experiments de camp duts a terme als sistemes d'es Comú de Muro, Mallorca (apartat 4.1.) i Cala Tirant, Menorca (apartat 4.2.) reafirmen el dit, tot i que ara a menor escala. Els resultats obtinguts en cada un del experiments realitzats coincideixen plenament amb l'efecte que ambdós agents poden tenir des d'un punt de vista geomorfològic i ecològic.

Tal i com es mostra al cicle representat a la Figura 194, la presència de morfologies embrionàries – e.g. *shadow dunes*, *echo-dunes* – incrementa per sí la rugositat superficial. Aquest fet tindrà com a conseqüència una major resistència vers la incidència energètica del vent, derivant-ne per tant amb una disminució de la seva velocitat, la qual suposarà un increment en la competència que aquest – el vent – tindrà en tant a la deposició – per gravetat – de les partícules de sediment que pugui transportar en suspensió. Si aquest procés es repeteix amb una certa recurrència, la projecció temporal del mateix derivarà amb un increment vers a la presència, primer de morfologies arenoses embrionàries, i en segon instància, de la colonització d'aquestes per part d'espècies psammòfiles. Es pot veure doncs que es tracta d'un procés tancat, cap i cua, a on un increment de la rugositat superficial és conseqüència de l'existència de morfologies arenoses i vegetació, però alhora també, n'ha de ser l'objectiu si es vol potenciar el desenvolupament d'aquesta situació.



**Figura 194:** Cicle teòric de la importància ecològica i geomorfològica de les morfologies embrionàries i vegetació psammòfila en fronts de sistemes dunars litorals.

El model teòric recentment comentat queda patent amb els resultats obtinguts per la part experimental d'aquest treball. Començant pel que fa a la dinàmica eòlica/energètica, les dades obtingudes dels tres experiments duts a terme mostren una disminució de la velocitat del flux un cop aquest supera la primera línia de vegetació i morfologies embrionàries. En termes absoluts un primer signe que es manifesta d'acord amb la teoria en són les diferències de velocitat que, en cada un dels casos, s'han registrat entre l'anemòmetre 1 – localitzat a la part alta de la platja, sota les condicions inicials de vent – i l'anemòmetre 2 – situat darrera la primera línia de vegetació –. Tant en els experiments de Cala Tirant (epígrafs 4.2.2.1. i 4.2.3.1.) com en el d'es Comú (epígraf 4.1.2.1.) les velocitats registrades en el segon punt sempre es presenten inferiors a les primeres. No obstant, aquest procés queda encara més clar de la interpretació que en deriva l'aplicació del *Fractional speed-up ratio*, el qual mostra també com en cada cas, la velocitat del vent disminueix un cop aquest supera la línia de vegetació i primeres dunes (veure més: es Comú de Muro, Figura 163 de l'epígraf 4.1.2.4.; Cala Tirant, Figura 173 de l'epígraf 4.2.2.4., i Figura 179 de l'epígraf 4.2.3.4.).

D'altra banda, la dinàmica sedimentària derivada dels experiments en qüestió es mostra també en consonància amb el que hem postulat fins al moment, donant fermesa doncs a que una disminució de la velocitat del vent sembla estar notablement

relacionada amb una major deposició sedimentària. En aquest sentit, els grup de trampes TA – localitzat a la part superior de la platja alta, devora l’anemòmetre 1 – en termes generals recull més sediment que no el grup TB – situat a la part posterior de la primera línia, devora l’anemòmetre 2 –. Si bé aquesta tendència és la predominant en cada un dels experiments duts a terme, sobretot es mostra ferma a la situació sota altes condicions energètiques (hivern) a Cala Tirant (epígraf 4.2.6.1.), mentre que és més discreta en els casos d’es Comú (epígraf 4.1.5.1.) i a Cala Tirant sota condicions d’energia baixes (epígraf 4.2.5.1.). Aprofitar aquest apunt per remarcar que aquest procés es veu notablement incrementat en condicions d’alta energia eòlica, que de fet, és quan més importància té des del punt de vista geomorfològic i sedimentari. Això indica doncs que, el fet de tenir una primera línia de dunes ben desenvolupades des del punt de vista ecològic i geomorfològic, ajudarà a disminuir l’impacte erosiu que pugui tenir un fort temporal de vent enfront als primers sectors emergits dels sistemes platja-duna.

Amb tot el dit, primer a nivell teòric, i després constatat per la part experimental, queden prou palesos els arguments que inciten a proposar com a mesura de gestió el fet de tenir cura i millorar l’estat de conservació de la primera línia de dunes. Partint de les proves ja exposades, tot ajudarà a incrementar els processos de retenció sedimentària i alhora disminuir els patrons d’erosió cap a l’interior del sistema.

- Òptim segellament de *blowouts* enfront la recuperació del front dunar

Tant la bibliografia (Hesp, 2002) i el marc teòric existent fins al moment, com també les dades empíriques postulades per distints treballs, i també per aquesta tesi, posen de manifest que l’existència de *blowouts* al llarg dels fronts dunars esdevenen canals de deflació controlats, principalment, per processos erosius, incrementant els balanços sedimentaris negatius per a la platja alta. No obstant, per definició, les formes *blowouts* són un element natural intrínsec als sistemes sedimentaris – no només litorals, sinó també continentals, com per exemple deserts –. Endemés, i entenen la seva condició de morfologies intrínseques a ambients arenosos, autors com Barchyn i Hugenholtz (2012; 2013) proposen un model teòric i conceptual que passa per la creació de nous *blowouts* com a mesura de reactivació de sistemes dunars fixats per la massa vegetal.



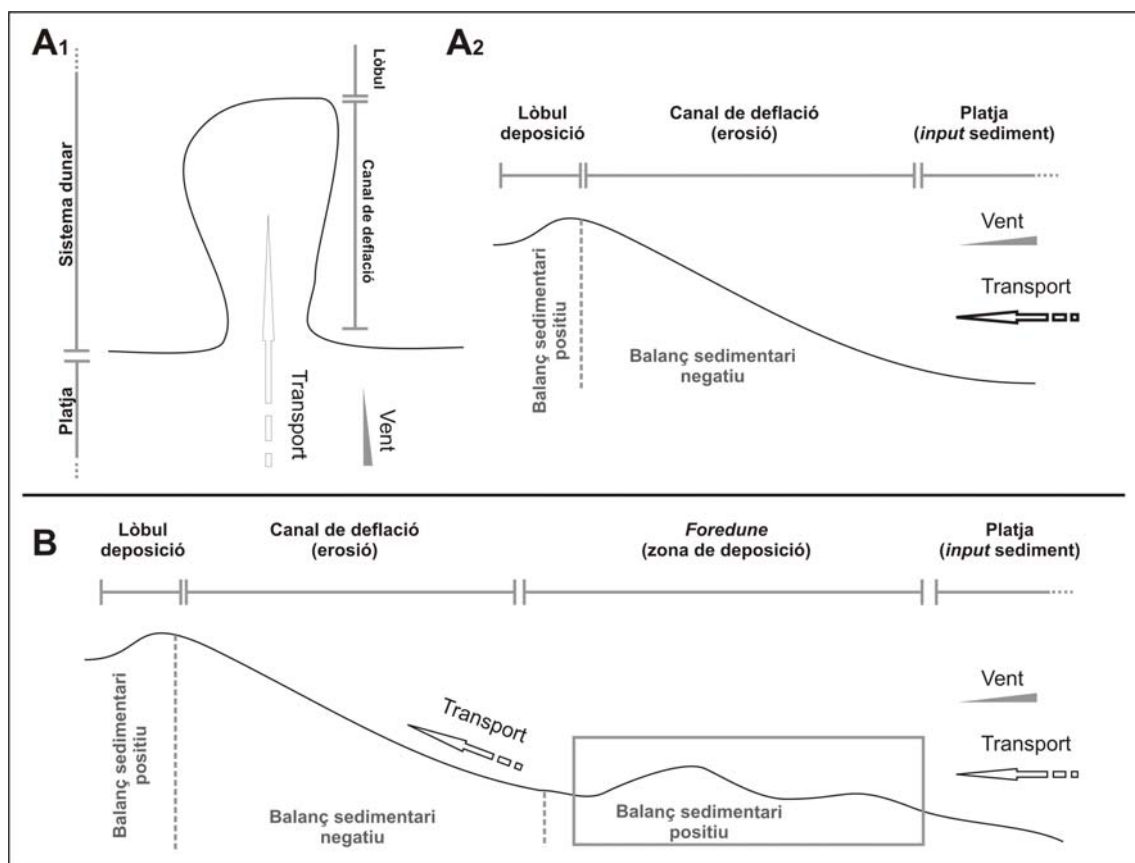
Enfront a les aparents contradiccions entre ambdues teories, cap pensar bé amb quina és la mesura de gestió més òptima, pensant alhora amb l'interès socioeconòmic que les platges tenen en un ambient com les Illes Balears. En una primera aproximació es podria postular el segellament sedimentari total del *blowout* (veure exemple a la Figura 23 de l'epígraf 1.6.5.) i, a partir d'aquí, la recuperació de la primera línia de *foredune*. No obstant, i partint del coneixement sobre la dinàmica que segueixen aquestes morfologies, i també de les seves implicacions vers la integritat del sistema, d'aquesta primera postulació en podrien aflorar dos aspectes negatius. En primer lloc, el fet de segellar per complet el *blowout* suposaria el modificar substancialment una característica intrínseca a la naturalitat dels sistemes sedimentaris, mentre que en segon instància, generaria un retràs notable en el procés de recuperació de la línia de *foredune*, primer per la quantitat sedimentària invertida en el rebliment de la plataforma erosiva, i en segon lloc, per una major dilatació temporal del procés.

Arribats a aquest punt, cap pensar amb quin és l'objectiu principal alhora de gestionar els *blowouts* en sistemes dunars d'emplaçaments turístics com les Balears. Si el propòsit primordial passa per disminuir o mitigar els processos erosius i així conservar balanços sedimentaris positius per a la platja alta – que és el subsector de major interès econòmic –, pot ser la millor proposta de gestió seria invertir des del principi tots els esforços en recuperar la primera línia, sense pensar tant amb la morfologia erosiva en sí.

Si anteriorment ja ha quedada clara la importància geomorfològica que una primera línia de duna consolidada pot tenir envers a la resta del sistema, la mesura de gestió òptima en aquest cas passaria per a segellar les morfologies *blowout* només en la seva boca – *throat* – a partir de mecanismes que ajudin a crear una línia de *foredune* amb la potència suficient com per a poder interferir amb la dinàmica sedimentària, i així evitar el traspàs d'arena des de la platja emergida cap a l'interior del sistema. Amb aquesta mesura doncs s'aconseguirien dos aspectes a comentar:

- S'aconseguiria interferir amb la dinàmica sedimentària des de la platja emergida cap a l'interior del sistema, i per tant, es disminuirien els patrons erosius. Tot plegat suposaria el compliment de l'objectiu principal postulat anteriorment.
- Es mantindria activa la morfologia *blowout*, natural i intrínseca a la idiosincràsia dels sistemes sedimentaris litorals.

La Figura 195A<sub>1</sub> i A<sub>2</sub> mostra com en la situació inicial – aquella que necessitaria aplicar la mesura de gestió – hi ha un traspàs sedimentari directe des de la platja cap a l'interior del sistema, generant doncs un balanç negatiu i per tant, problemes d'erosió i pèrdua de sediment. La intervenció en primera línia, centrada amb la recuperació d'una línia de *foredune* consistent, ajudaria automàticament a canviar els patrons sedimentaris, ara suposant una balanç sedimentari positiu en primera línia, i limitant els patrons erosius al canal de deflació (Figura 195B). Aquest nou escenari ajudaria a; a) mantenir disposició sedimentària per a la platja, alhora que interferir amb els processos erosius de la mateixa a conseqüència del transport sedimentari, i b) mantenir intacta la morfologia *blowout* en sí, deixant que de manera natural es segelli o bé, activi el sistema dunar des d'un punt de vista dinàmic i sedimentari.



**Figura 195:** Esquema – sense escala – per a la recuperació de la primera duna com a mesura indirecte de gestió sobre morfologies *blowout*.

- Bones pràctiques vers a la instal·lació de trampes de retenció sedimentària

Varis en són els mecanismes per a interferir amb la dinàmica sedimentària dels sistemes platja-duna, i evitar així que els patrons d'erosió s'incrementin. En consonància a la proposta anterior, la mesura més comuna que fins al moment s'utilitza a les Illes Balears en tant a la gestió dels fronts dunars és la disposició de trampes d'interferència sedimentària. No obstant, és comú veure com, amb certa recurrència, aquestes es disposen erròniament i fent cas omís a criteris tècnics. Es podrien destacar dues errades (Figura 196); a) situar trampes a la cara de sobrevent de la duna, a on el transport sedimentari és gairebé inexistent, i b), instal·lar les trampes seguint una disposició paral·lela a la línia de costa, i no tenint en compte la direcció dels vents efectius.



**Figura 196:** Exemples sobre la mala disposició de trampes d'interferència sedimentària en sistemes litorals arenosos. L'imatge A mostra l'escassa eficiència mostrada per trampes disposades a la cara de sobrevent de la primera duna en el sistema de Cala Mesquida (Mallorca), mentre que l'imatge B exemplifica l'escassa eficiència de trampes diposades responent a l'orientació de la línia de costa, sense tenir en compte els vents predominants incidents; exemple de la platja de Can Picafort (Mallorca).

Sota una correcte utilització, les trampes d'interferència es presenten com una de les mesures més blanques, econòmiques i senzilles a l'hora de gestionar la recuperació dels fronts dunars, i en particular també, d'interferir la dinàmica sedimentària terra endins a partir de la presència de *blowouts*. Tanmateix, i com ja s'apuntava i s'il·lustrava a l'epígraf 1.6.5., l'eficiència d'aquesta mesura desapareix si no s'aplica seguint criteris tècnics que responguin al coneixement de la dinàmica d'aquests ambients. Com es comentava, la premissa principal passa per disposar les trampes,

sempre, perpendiculars a la direcció dels vents incidents principals (veure Figures 25 i 26 de l'epígraf 1.6.5.), i no seguint l'orientació de la línia de costa.

Tot i no haver experimentat amb trapes d'interferència sedimentària, la disposició multidireccional de les trapes utilitzades en els experiments realitzats ens ha permès veure la relació directe entre patrons de transport i direcció del vent incident. Les dades, mostrades i explicades als epígrafs 4.1.5.1. (es Comú de Muro), 4.2.5.1. i 4.2.6.1. (Cala Tirant), manifesten que en termes generals existeix una relació entre els patrons principals de transport i la direcció del vent predominant – en els moments de mostreig –. Cap dir que aquesta relació es mostra més discreta en situacions a on les velocitats del vent no són gaire elevades (Taula 54 de l'epígraf 4.1.3.1.; Taula 62 de l'epígraf 4.2.5.1.), mentre que s'incrementa notablement sota condicions energètiques altes (Taula 65 de l'epígraf 4.2.6.1.). Aquest fet reafirma encara més la importància de disposar les trapes perpendiculars a la direcció dels vents incidents, sobretot per a la seva eficiència en períodes de forta energia que, de fet, és quan més transport sedimentari hi ha.

En resum, la instal·lació de trapes s'ha de basar en el coneixement dinàmic dels sistemes, sobretot de la vessant eòlica i sedimentària. Tot i ser una mesura aparentment senzilla, una mala praxis en la seva instal·lació pot suposar una manca total d'eficiència. Com més en consonància estiguin les trapes vers als vents incidents més capacitat de retenció sedimentària tindran, i més ajudaran a disminuir la tendència erosiva de la platja emergida.

### **6.3. Un exemple de gestió en *blowouts*. Eficiència o mala praxis?**

Tal i com es comentava al capítol 2 (epígraf 2.4.4.1.), en el cas d'es Comú de Muro (Mallorca), tot i inicialment estar programat dur a terme dos experiments per a estudiar la dinàmica eòlica i sedimentària del *blowout* seleccionat – a l'igual que en el cas de Cala Tirant –, les mesures de gestió aplicades per la Demarcació de Costes de les Illes Balears, i la impossibilitat d'obtenir els permisos per a la seva retirada temporal i posterior execució de l'experiment, han fet que vers aquesta situació, en el present treball, i basant-nos en els coneixements adquirits al llarg de la tesi, es facin algunes valoracions de la situació actual del *blowout*, i del grau d'eficiència de les mesures de gestió que hi han estat aplicades.

### 6.3.1. Descripció genèrica de la situació actual

Durant l'execució de la present tesi, un cop el primer experiment, la Demarcació de Costes de les Illes Balears, responsable i administració competent, va dur a terme la implantació d'algunes mesures de gestió sobre el front dunar d'es Comú de Muro, i en concret, sobre el *blowout* inicialment seleccionat per a dur-hi a terme l'experimentació referent a dinàmica eòlica i sedimentària. Les mesures de gestió aplicades es basen principalment en tres actuacions; a) reparació del cordó dissuasiu, b) instal·lació de trampes d'interferència sedimentària, i c) sembra artificial de vegetació arbustiva. Endemés, i tal i com es mostra a la Figura 197, s'ha potenciat la política informativa i divulgativa a partir de cartells – de cara als usuaris –.

A grans trets, i en una primera aproximació, tot indica que els objectius de la intervenció són principalment tres:

- Recuperació geomorfològica de la primera línia de duna
- Recuperació de la cobertura vegetal
- Millora informativa que ajudi a una major grau de conscienciació per a l'usuari

Des del punt de vista científic i tècnic es perceben, però, alguns aspectes que donen peu a ser comentats, basats tots ells amb els resultats empírics obtinguts dels resultats presentats en aquest treball, i també, de la caracterització física i geogràfica de la morfologia *blowout* en sí, i també de les característiques del context a on aquest es troba localitzat.



**Figura 197:** Vista general – frontal – del *blowout* a n'es Comú després de l'aplicació de mesures de gestió per part de la Demarcació de Costes de les Illes Balears. Foto del 14/11/2013

No obstant, la implantació de mesures no sempre té com a resultat una millora de la situació. Aquest apartat pretén així donar racionalitat a les mesures de gestió abans mencionades i reflexionar, basant-se amb la situació actual, sobre el seu grau d'eficiència, i sobre la seva contribució vers a la millora del front dunar.

### 6.3.2. Mesures de gestió ecològiques

Des del punt de vista ecològic el pla de gestió implantat en aquest *blowout* es redueix a la sembra artificial d'alguns individus de *Juniperus oxycedrus* subs. *macrocarpa* al llarg de la canal de deflació (Figura 198). Basant-nos en el marc teòric sobre el paper de la vegetació vers al desenvolupament dels sistemes dunars, la vegetació de característiques herbàcies és la que ajudarà a la retenció sedimentària en primera línia, mentre que la de característiques llenyoses és la que, a partir de la seva estructura reticular, fixarà consistentment les morfologies arenoses amb tendència a estabilitzar-les.



**Figura 198:** Imatge sobre la sembra artificial de *Juniperus oxycedrus* subs. *Macrocarpa* al llarg del canal de deflació. Foto del 14/11/2013.

D'altra banda, tal i com mostra la imatge, tot apunta a que no s'ha seguit cap criteri tècnic vers la sembra. Per què al canal de deflació, i no al final del *blowout*? Es segueix algun patró espacial per a determinar els llocs de sembra? És necessària la sembra d'aquesta espècie si la situació actual demostra per sí sola que, un cop es limita la pressió d'usuaris sobre la morfologia aquesta creix de forma natural al llocs de major disponibilitat sedimentària? (Figura 199).



**Figura 199:** Naixement natural d'individus de *Juniperus oxycedrus* subs. *macrocarpa*. Foto del 14/11/2013.

Si un dels objectius principals passa per a una millora del front dunar, pot ser la mesura correcte des del punt de vista ecològic passaria per a potenciar la cobertura vegetal herbàcia en primera línia, i no la sembra de vegetació arbustiva. Com fèiem esment a l'anterior apartat (veure *La importància de les morfologies arenoses embrionàries i la vegetació herbàcia*), un increment de la cobertura vegetal herbàcia en primera línia no tan sols té connotacions ecològiques, sinó que també ajuda a incrementar la rugositat superficial, a incrementar la capacitat de retenció sedimentària, i per tant, a potenciar el desenvolupament de noves morfologies embrionàries.

Endemés, i com també es mencionava a l'anterior apartat, el segellament òptim de les morfologies *blowout* passa per una intervenció a la seva boca – *throat* –, ajudant així

a) evitar els patrons d'erosió sedimentària des de la platja cap a interior, i b) mantenir els *blowouts* com a morfologies intrínseques a la naturalesa dels sistemes sedimentaris.

Partint d'aquestes consideracions, basades amb la teoria testada, i també en els resultats empírics i experimentals d'aquesta tesi, la sembra aleatòria d'individus arbustius no sembla que contribueixi a cap millora vers l'estat de recuperació del front dunar, sinó més bé a una fixació interna de la pròpia morfologia.

### 6.3.3. Mesures de gestió geomorfològiques

Pel que fa a la intervenció destinada a la recuperació geomorfològica del front dunar en general, i del *blowout* en particular, aquesta es limita a la instal·lació d'una trampa d'interferència sedimentària just a la boca de la morfologia. La seva extensió, entre ambdues parets laterals, suposa un segellament artificial de la plataforma erosiva, amb el suposat objectiu d'interferir el màxim sediment possible provinent de la platja emergida. Tal i com il·lustra la Figura 200, la seva instal·lació es du a terme de manera paral·lela a la línia de costa – pràctica habitual a les Illes Balears –.



**Figura 200:** Trampa d'interferència sedimentària a la boca del *blowout*, paral·lela a la línia de costa. Foto del 14/11/2013.



Tanmateix, la situació actual ens deixa ben palès que l'eficiència que per el moment té aquest intervenció és nul·la, tal i com mostra la Figura 201, deixant en evidència la poca interferència sedimentària que suposa. La imatge de detall reflecteix com els patrons de retenció no són visibles fins al moment, encenent la sospita de si la seva instal·lació requereix d'una revisió o modificació.



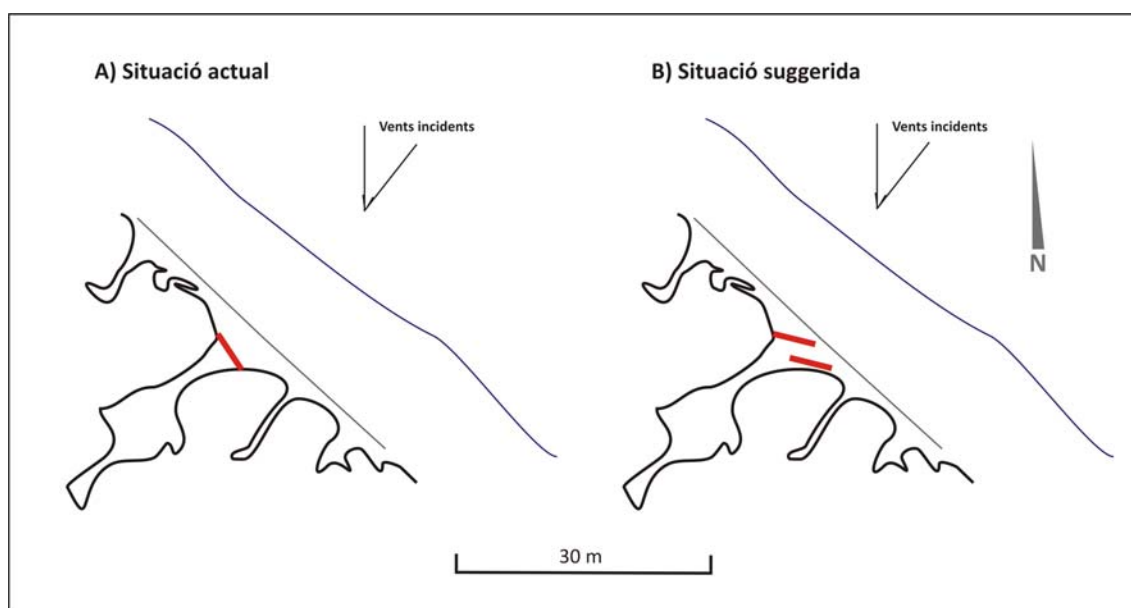
**Figura 201:** Imatges de detall de la trampa d'interferència sedimentària, i del baix grau d'eficiència mostrat a dia d'avui. Foto del 14/11/2013.



**Figura 202:** L'orientació dels *ripples marks* a la platja emergida, just al davant de la morfologia *blowout* analitzada, respon a la incidència dels vents de component N, predominants a la badia d'Alcúdia. Foto del 14/11/2013.

Si bé la conseqüència passa per una eficiència notablement millorable, la causa es basa en una incorrecte instal·lació de la trampa en qüestió. Els registres històrics dels vents incidents a la badia d'Alcúdia (Servera et al., 2002), ajudats per l'estructura de la mateixa, indiquen que la component principal és la de N-NE. Aquesta orientació queda reflectida també amb la disposició dels *ripples marks* fotografiats recentment (Figura 202), els quals indiquen una incidència eòlica predominant que respon a les dues components abans mencionades – sobretot a vents de component N –.

Amb tot, cal apuntar però que en aquest cas, i com es repeteix amb recurrència al llarg dels sistemes dunars a les Illes Balears, la disposició de la trampa no sembla anar d'acord amb la incidència dels vents efectius – que són l'agent responsable del transport sedimentari en aquests ambients –, sinó en funció a la orientació de la línia de costa. En aquest sentit, la trampa està perfectament instal·lada de forma paral·lela a la mateixa.



**Figura 203:** Representació esquemàtica de la disposició i orientació de les trampes suggerida envers a la component dels vents principals incidents.

Com bé ja s'ha fet referència en aquest treball, en concret al llarg de l'epígraf 1.6.5. (capítol 1), i també a l'apartat anterior, la instal·lació de trampes en aquests ambients ha d'anar sempre en funció de la incidència dels vents predominants, ja que seran aquests els que mouran i transportaran arena des de la platja emergida cap a l'interior. Aquesta doncs serà l'única manera en que l'aplicació d'aquesta mesura tindrà efectivitat des d'un punt de vista geomorfològic, ja que sinó la seva utilitat sols es

limitarà a actuar com a una mesura dissuasiva enfront al pas d'usuaris. Responent a l'actual situació, i com bé queda reflectit a les imatges de la Figura 201, l'eficiència d'aquesta mesura és de moment nul·la enfront a una captació sedimentària que ajudi, primer a segellar el *blowout*, i en segon lloc, a una recuperació de la primera línia o *foredune*. Atenent a les condicions concretes donades en el present *blowout* la Figura 203 suggereix la disposició òptima en tant a la disposició de les trampes sedimentàries amb la finalitat de que aquestes incrementessin la seva eficiència.

#### 6.3.4. Valoració general de l'estat actual

Si comparem la situació en que es trobava el *blowout* analitzat a n'es Comú de Muro el dia de la campanya de dinàmica eòlica i sedimentària (27-28 de juny de 2012) amb el seu estat actual (14 de novembre de 2013), un cop les mesures de gestió hi han estat aplicades, es percep que la seva eficiència ha estat gairebé inexistent.

Des del punt de vista ecològic, l'impuls de vegetació psammòfila en primera línia suposaria una interferència dels patrons sedimentaris de cap a l'interior del *blowout*, i alhora una estabilització dinàmica d'aquest. Endemés, i com es mostra a la Figura 199, la vegetació llenyosa lligada a la morfologia té la capacitat de créixer de manera natural. El que queda palès és que amb una sembra com la que s'ha dut a terme no es contribueix directament sobre una millora del front dunar – que és un dels objectius –, sinó que sols es pot respondre a una fixació forçada de la morfologia. En detriment, un increment de la vegetació herbàcia en primera línia sí ajudaria a una millora ecològica i geomorfològica, alhora que també potenciaria indirectament la fixació de la morfologia erosiva a partir del naixement natural d'espècies.

Tot i que aparentment semblin distants, les mesures enfocades a la recuperació ecològica estan íntimament relacionades amb les que es proposen aconseguir una millora de l'estat geomorfològic. Amb aquest sentit, la baixa eficiència de recuperació sedimentària en la primera línia passa també per una absència vers potenciar el creixement de vegetació herbàcia en aquest emplaçament, i que aquesta ajudi al procés de captació.

Endemés, i ja per concloure, la manca de criteri tècnic i científic vers a la disposició de la trampa de retenció sedimentària fa que de moment els resultats en siguin totalment absents. En aquest sentit la trampa hauria d'estar disposada perpendicular a la direcció dels vents predominants. En aquest cas doncs, si els vents

que més incideixen són els de component N-NE, l'orientació de la trampa hauria de seguir una direccionalitat O-E o NO-SE.

La conclusió sobre la valoració de l'estat actual del *blowout*, després d'haver estat sotmès un temps a l'efecte de les mesures de gestió aplicades, és que aquestes no han estat efectives vers a la recuperació de la primera línia de duna. A mode de síntesi, després d'haver fet les consideracions que donen resposta a la causa d'aquesta manca d'eficiència, les consideracions basades amb la part experimental d'aquest treball passarien per:

- Fer una millor gestió de la primera línia des del punt de vista ecològic, que ajudés a un increment de la cobertura vegetal d'espècies psammòfiles (e.g. *Ammophila arenaria*), i indirectament, a un augment del grau de rugositat superficial, que alhora ajudaria incrementar la retenció sedimentària i la formació de dunes embrionàries.
- Aplicar criteris tècnics i empírics alhora de la instal·lació de les trampes d'interferència sedimentària. En aquest cas es recomana que el criteri sempre passi per a considerar la component direccional dels vents principals a la zona, i en cap cas per a tenir en compte altres criteris, com per exemple l'orientació de la línia de costa.

-



# Capítol 7

---

**Seria molt poc feliç si pogués dir fins a quin punt ho sóc**  
*(William Shakespeare)*

## Conclusions



**CAPÍTOL 7 \_ CONCLUSIONS****7.1. Blowouts characterization of dune systems in Mallorca and Menorca**7.1.1. Es Comú de Muro (Mallorca)

- Among all the systems analysed, this is the one with the highest number of blowouts; 58 along 1.5 km, supposing a density of 0.04 blowouts/m.
- 4 degraded areas have been identified, being the places with highest rates of erosion and geomorphological fragmentation.
- Spatial perspective from data obtained shows how the blowouts slope decreases as their length increases. The opposite situation shows that shortest blowouts have a higher degree of slope.
- In general terms, the blowouts dimensions decrease from their throat to their innermost part.
- The 68.97% of blowouts has an orientation of NNE-SSW, whilst the 24.14% has it of ENE-WSW (both together suppose the 93.1%). These orientations respond to the incidence of the main winds (N-NE), and to the bay's aperture.
- There are two categories of blowouts; trough blowouts (56.9%) and mixed blowouts (43.1%). This categorization is reaffirmed by the application of iT<sub>x</sub> index, which adds 3 sub-typologies of trough blowouts. According to their structure the 62.1% of blowouts presents a simple shape, while the 36.2% are branched.
- The herbaceous vegetation is the one with highest weight along the dune front (with a total amount of 19 species inventoried). There are some species that present a high level of recurrence, and high patterns of similarity to each other (e.g. *Ammophila arenaria* or *Lotus cytisoides*).
- Cluster analysis shows that there are some vegetal associations that represent a high degree of similarity among their species, suggesting that these species are important as for the conservation of dune systems (e.g. *Crucianella maritima*, *Aetherohiza bulbosa* subsp. *bulbosa*, *Matthiola incana*, *Pancratium maritimum*, *Cutandia maritima*, *Eryngium maritimum*, *Ammophila arenaria*, and *Lotus cytisoides*, existing in 40-58 of the blowouts and with patterns of similarity to each other between 80-100%).



- The integral analysis (taking into account morphological, ecological and management variables) of the 58 blowouts suggests that there is not any general pattern to characterize all the morphologies analysed in a standard way.

#### 7.1.2. Cala Agulla (Mallorca)

- In general terms the mean recoil patterns of the dune front of Cala Agulla between 1956-2008 are fixed in 10-20 m. The places with highest erosion rates coincide with the main entrances to the beach by users, reaching maximums of -120 m of backward motion.
- The dune front of Cala Agulla, of about 600 m long, has an overall of 14 blowouts that supposes a density of 0.04 blowouts/m.
- The slope of the blowouts decreases as their length is higher, while on the other hand, the shortest blowouts have a higher degree of slope.
- In general terms, the blowouts dimensions decrease from their throat to their innermost part.
- The main orientation of the blowouts is NNE-SSW (28.5%), although to highlight also NE-SW, ENE-WSW and E-W, each one representing 21.4%. The mean orientation, according to the cove's aperture, is of 47.9° (E-W).
- In this study case 2 degraded areas are identified, where it is found the maximums of erosion and geomorphological fragmentation.
- There are 5 categories of blowouts according to their shape; trough blowouts (50%), mixed blowouts, conical blowouts, bitten blowouts (14.29%), and saucer blowouts (7.14%). Conical blowouts are typical of this case study, no longer identified in any other system. As for their structure, simple shapes (78.57%) are more important than branched shapes (21.43%).
- There are some species associations that show a high degree of similarity to each other, so they are notably important as for the conservation of dune systems (e.g. *Cakile maritima*, *Ammophila arenaria*, *Cutandia maritima*, *Pancratium maritimum*, *Lotus cytisoides* and *Matthiola incana*, existing in more than 10 blowouts, and with patterns of similarity to each other between 80-90%).
- According to the relation between vegetation type and blowout typology, herbaceous species show their highest relation with mixed blowouts ( $R_{t-v} = 0.68$ ), while the lowest relation is with saucer blowouts ( $R_{t-v} = 0.43$ ). The maximum in the

case of woody vegetation is again with mixed blowouts ( $R_{t-v} = 0.44$ ), whilst the minimum is with bitten blowouts ( $R_{t-v} = 0.31$ ).

- Once considered all the variables, the degree of similarity among each morphology is high (60-90%). Nevertheless, it is difficult to establish similarity patterns differentiating different groups.

### 7.1.3. Cala Mesquida (Mallorca)

- The development of the Cala Mesquida dune system, perpendicular to the coastline, is different to the general pattern of most of the systems in the Balearic Islands. The recoil of its dune front suggests how the erosion processes have dominated over the last decades. In general terms the mean backward motion of the first line of dunes is of about -20.13 m, with a rate of 0.37 m/year.

- The recoil has been asymmetric spatially and temporally. In this sense there is a strong relation between the points with the highest erosion rates and the ones with highest user pressure.

- The herbaceous vegetation along the first strip of dune in Cala Mesquida has also suffered an important degradation since 1956 to nowadays, with a loss of 32.329 m<sup>2</sup>.

- There is a direct relation between the dune front recoil and the degradation of vegetation cover. The highest accumulated recoil is between 1956-1997 (-11.26 m), as well as the most significant vegetation loss (-10.796 m<sup>2</sup>). In fact, from 1997 there is a stabilization of the dune front that is also supported by a recuperation of vegetation cover. Finally, between 1996-2010, the recoil of the dune front again (-9.33 m) and the loss of vegetation (-2.288 m<sup>2</sup>) increases again.

- Although in a different scale, the structure and behaviour of the dune complex in Cala Mesquida is assimilated to the one of blowout morphology.

- The evolution of the main lobe since 1956 to 2010 shows the dynamism of this system, with an advance of 86.5 m and a rate of 2.1 m/year.

- If it is related the lobe evolution and the loss of vegetation cover it is seen how in this case the stabilization is later, now visible in 2002. This is because the stabilization of the innermost part of the dune system depends on the stabilization occurred before in the dune front.

- The development of the dune complex in Cala Mesquida, perpendicular to the coastline, is highly conditioned by? the accommodation space, which responds to the topographic features derived from its structural conditions.

#### 7.1.4. Cala Tirant (Menorca)

- The dune front of Cala Tirant, of 350 m long, has an overall of 7 blowouts and a density of 0.02 blowouts/m.
- The slope of the blowouts decreases when they present higher lengths, while the shorter blowouts have a stronger degree of slope.
- In general terms, the blowouts dimensions decrease from their throat to their innermost part.
- The main orientation in this case is clearly of NNW-SSE, supposing the 71.4% over the total. This is related with; a) the cove's aperture, and b) the incidence of the main winds.
- An overall of 4 categories can be distinguished as for the blowout's shape in Cala Tirant. Trough and saucer blowouts are the most important typologies, both meaning the 33.3% over the sample. Finally there are mixed blowouts and bitten blowouts, with a 16.1% each. In this case all the morphologies have a simple structure.
- According to its presence, herbaceous vegetation (13 species inventoried) has more weight than woody vegetation, only with 3 species. Highlight the presence of some species such as *Ammophila arenaria*, *Eryngium maritimum*, *Euphorbia paralias* or *Cakile maritima*, each identified on the 100% of the blowouts, and with a similarity index to each other of 100%. In general terms, the pattern of similarity between herbaceous species is high, oscillating between 60-100%.
- According to herbaceous vegetation, its maximum of relation is found with trough blowouts ( $R_{t-v}= 0.54$ ), whilst the minimum is with mixed blowouts ( $R_{t-v}= 0.42$ ). There is not any important pattern related to woody vegetation.
- The association degree between blowouts in Cala Tirant (considering all the variables) is notably homogeneous, oscillating between 70-100%. We can conclude that in this case the similarity between blowouts, taking into account their geomorphological and ecological characterization, is high.

#### 7.1.5. La Vall (Menorca)

- Along a dune front of 200 m, there are a total of 7 blowouts with a density of 0.035 blowout/m.
- In this case there is a positive relationship between length and slope, suggesting that when one of them increases, the other does the same in a constant proportion. However, the relation is negative when considering length and slope.
- The 100% of the blowouts identified in La Vall dune system have an orientation of NNE-SSW (mean orientation of 28°), remaining in relation with the cove's aperture.
- In general terms, the blowouts dimensions decrease from their throat to their innermost part. As for the inner topography this is the system that presents more complexity. There are some examples of blowouts with a high heterogeneity in its topography, or even some examples of blowouts refurbished by sand deposition.
- There are only 2 typologies of blowouts according to their shape; trough blowouts (57.14%) and saucer blowouts (42.68%). Each case presents a simple structure.
- The herbaceous vegetation, with 12 species inventoried, is the most important along the dune front of La Vall. I would? highlight species such as *Ammophila arenaria*, *Eryngium maritimum*, *Euphorbia paralias* and *Cakile maritima*, present in a 100% of the blowouts sampled, and with a similarity of 100% to each other. In general terms herbaceous species have a high pattern of similarity, oscillating between 80-100%.
- The similarity degree between all the blowouts in this case is about 70-100%.

#### 7.1.6. S'Olla (Menorca)

- As it was commented in Cala Mesquida (Mallorca), geomorphology and evolution of the dune complex in s'Olla, perpendicular to the coastline, is a differential feature of most of the coastal dune systems in the Balearic Islands.
- The dune front of s'Olla is characterized by a strong control of erosion processes since 1956 to nowadays. This has supposed mean accumulated recoil of -33.5 m and a rate of -0.6 m/year.

- This trend has not been homogeneous temporally speaking. From 2002, due to some management measures applied, the situation changes, now showing certain recuperation along the first line of dune, as well as decreasing its erosion rates.
- The first line of tree vegetation associated to the dune system of s'Olla has suffered too a degradation trend over the analysed period (1956-2012), with an accumulated loss of 16.374 m<sup>2</sup>.
- Temporally speaking, the stabilization and recuperation of the first line of dune since 2002 is as well corresponded with a stabilization of the vegetation cover. This reaffirms again the synergy existing between the vegetation recovery and the geomorphological recovery.
- There is a direct relationship between the conservation state of foredune and the lobe advance. The maximum rate of lobe advance, occurred over the period 1956-1979, coincides with the maximum of the foredune recoil, fixed in -48 m and with a rate of -2.1 m/year.
- In this case, as it was concluded in Cala Mesquida dune system (Mallorca), the development of the dune complex, perpendicular to the coastline, is related with the accommodation space existing nowadays, derived from the structural disposition and topography.

#### 7.1.7. Main conclusions

- The conservation or fragmentation state of the coastal dune systems of Mallorca and Menorca (Balearic Islands) is highly related to the presence of blowouts morphologies along their dune fronts. The dune complex of es Comú de Muro (Mallorca) is the one with the maximum number of blowouts; an overall of 58. However, in relative terms, the density values showed by the systems in Mallorca; es Comú and Cala Agulla (both with 0.04 blowouts/m) are slightly higher to the ones in Menorca; La Vall (0.03 blowouts/m) and s'Olla (0.04 blowout/m).
- Generally the highest densities always coincide with the main entrances to the beach by users, and so, with the areas with highest human pressure. In two of the study areas, es Comú de Muro and Cala Agulla (Mallorca), the maximums of erosion are not located in simple blowouts but in degraded areas.
- The blowout dimensions decrease from their throat to their innermost part. In this sense in their frontal part is where the erosion degree is higher.

- In each of the study areas, the orientation of the blowouts existing is related with two aspects; a) the bay or cove orientation, and b) the direction (component) of the main winds.
- As for the morphological characterization, Cala Agulla (5 categories) and Cala Tirant (4 categories) are the ones with higher diversity, while in es Comú de Muro and s'Olla there are only 2 categories. Trough blowouts are the most important type in each of the systems, followed by saucer blowouts. Mixed blowouts and bitten blowouts are presented as a combination of the two preceding.
- In Menorca the 100% of blowouts analysed have a simple structure. These are the most important in Mallorca too, representing the 62% in es Comú de Muro, and the 78.5% in Cala Agulla.
- Herbaceous vegetation is the most important over the blowouts inventoried. In relative terms its weight is expressed in 70.3 % in es Comú de Muro, 65.2% in Cala Agulla, 81.25% in Cala Tirant, and 92.3% in La Vall. That means that the 77.2% of the overall inventoried species belong to herbaceous vegetation.
- In each of the study sites there are some species that stand out due to their high presence and recurrence, as well as their similarity to each other. These groups have to be taken into account because their importance is related to? the conservation of the dune fronts. *Ammophila arenaria* is the most important specie, existing in every dune system studied. Furthermore, within this group other species stand out, such as *Eryngium maritimum* and *Cakile maritima* (present in 3 systems), and *Matthiola incana*, *Pancreatium maritimum*, *Cutandia maritima*, and *Euphorbia paralias* (existing in 2 systems). Moreover, each of them has an important rate of recurrence.
- Similarity patterns among all the blowouts analysed are generally high, oscillating between 60-100%. Nevertheless the associations are heterogeneous, being difficult to establish general patterns to characterize all the blowouts in a general and standard way. In general terms the blowouts studied in Menorca present a slightly higher similarity than the ones in Mallorca.

-

## **7.2. Aeolian dynamics and sediment transport**

### 7.2.1. Es Comú de Muro (Mallorca)

- According to the low energetic conditions registered over the 24 h experiment, aeolian dynamics was insignificant as for the geomorphological changes. The maximums of wind speeds were around  $4\text{-}5\text{ ms}^{-1}$ .
- Over this fieldwork campaign the maximum energy was registered at the upper part of the emerged beach (input zone) and along the deflation basin, whilst the lowest energy occurred in the innermost part of the blowout. This distribution suggests an increase of wind speed along the deflation basin according to the flow channelization (due to the static pressure exerted by topography), and a divergence once the flow reaches the inner part. This trend is supported by the model about wind flow behaviour, highlighting the role that topography can play over the flow distribution.
- The control exerted by topography is clearly visible on the application of Fractional speed-up ratio, which suggest; a) the effect played by the presence of echo-dunes and herbaceous vegetation on the first line (decreasing the wind speed), b) progressive increase of the wind velocities along the deflation corridor, and c) a loss of the wind speed once the flow reaches the inner part of the blowout, related to its divergence.
- The poor energy intensity recorded in this case meant that sediment transport was almost non-existent. In general terms the areas with maximum sedimentation were the innermost part of blowout (TC), and the upper part of the emerged beach (TA), whilst the minimum was behind the echo-dunes (TB). This fact stands up again the role that the presence of echo-dunes and herbaceous vegetation can play as for the patterns of sediment transport.
- Temporally speaking there is a relationship between the moments of maximum sedimentation and those when the energy was higher. Nevertheless, this relationship there is not exists? - does not exist? in spatial terms, because the places with highest sedimentation rates (TC and TA) do not coincide with the maximums of wind speeds (recorded along the deflation corridor). This allows concluding that it is important to distinguish between erosion area and sedimentation area.

### 7.2.2. Cala Tirant (Menorca)

#### *7.2.2.1. Experiment under low energy*

- In temporal terms, the highest energy occurred over the morning, between 10:00 h and 15:00 h. Spatially speaking, the maximums were registered on the inner ramp of the blowout (anem. 4), with a mean speed of  $4.4 \text{ ms}^{-1}$ , and on the inner rim (anem. 5), with  $3 \text{ ms}^{-1}$  of mean velocity. On the other hand, the minimums were recorded behind the foredune strip (anem. 2), with a mean of  $0.5 \text{ ms}^{-1}$ .
- Considering the direction, the data obtained from each anemometer are closely related with flow behaviour once it reaches the inner of the blowout. Under initial conditions of N onshore winds at anemometer 1 (input point), the flow, once exceeds the throat, is channelled along the deflation corridor. Then, at the depositional lobe, there is an expansion of the flow. This trend insists in reaffirm the role played by topography on both channelling and expansion processes.
- The effect played by the topography is also visible on the application of Fractional speed-up ratio, not only according to the wind direction but also related to its speed. Departing from an initial situation (anem. 1), there is a wind velocity decrease just behind the foredune strip (anem. 2). However, once the flow exceeds the throat of the blowout (anem. 3) the wind speed starts to progressively increase until it reaches the upper rim (anem. 5), where the velocity starts to decrease. This reaffirms that the static pressure exerted by topography generates a flow compression and an increase of its velocity. When this pressure is lost on the depositional lobe, the speed decreases again.
- Sediment transport recorded in this fieldwork campaign was low. Over the 24 h experiment, in the input place, with a mean wind speed of  $1.8 \text{ ms}^{-1}$  (anem. 1), the traps group TA registered a total of  $0.086 \text{ kg m}^{-1}$ . The group TB, with a mean speed of  $0.5 \text{ ms}^{-1}$  (anem. 2) captured an amount of  $0.039 \text{ kg m}^{-1}$ . Finally, group TC (depositional lobe), with a mean value of  $3 \text{ ms}^{-1}$ , captured  $3.089 \text{ kg m}^{-1}$ . In this sense, the depositional lobe coincides with the depositional area, whilst the low sedimentation in the area located behind the foredune strip reaffirms the role that vegetation plays as for sediment retention.
- From the relation between energy conditions and patterns of sediment transport, two final considerations according to the limiting factors exist?. The low fetch distance that aerial beach supposes (as an area with available sand to be transported), generates that sedimentation rates in TA are low. Secondly, the higher rugosity on the foredune strip supposes a decrease of wind speed and, in consequence, an increase of sand deposition.



7.2.2.2. *Experiment under medium-high energy*

- Channelization of wind flow within the blowout, induced by the topography, increases its velocity and subsequently its erosive power, whilst in the backside, the expansion of the flow decreases its speed and enables depositional processes. Nevertheless both agents are greatly linked to each other because wind speed and wind direction are substantially controlled by topography and morphometry of the blowout and the overall landform.
- Two aspects should be taken into account according to the relation wind-topography. Firstly the influence of the echo-dunes and herbaceous vegetation (e.g. *Ammophila arenaria*) in the outer margin of the blowout. Their presence supposes an increase of the surface rugosity, enhancing a decrease of wind speed and a diversification of its flow. Secondly, being a bowl blowout with a throat in its outer margin exposed to the incident winds, it generates a channelization of the air flow along the deflation basin which, helped by the inner morphometry, increases its speed and consequently its capacity for sediment remobilization. Once the airflow reaches the upper margin of blowout it loses the control exercised by topography, supposing a decrease of its speed and a significant flow expansion.
- The wind incidence within the blowout is an important factor to take into account when considering its morphological changes. The present work allows observing two different processes, which from the angular incidence of wind on the lateral walls of the blowout generate different sedimentary behaviours. In this case, the east wall, with an incidence of perpendicular winds to its orientation suffered a huge number of sediment collapses which, under the wind pressure and by gravity force, were depositing sand amounts on the deflation basin later transported by the flow to the innermost. Unlike this process, on the western wall, under the incidence of parallel winds to its orientation, it was produced a progressive dismantlement of the sand dune which, helped by the airflow canalization, was directly conducted toward the depositional lobe.
- The patterns of sediment transport are also highly conditioned by; a) wind features (speed and direction) and, b) by the topography of blowout and surrounding areas. However the results allow seeing how in some cases this relationship wind-transport is not perfect. The place where the highest amount of sedimentation (at the upper rim of blowout, in the depositional lobe) does not

coincide with the point of highest wind speeds (deflation channel). Thus the results obtained allow concluding that the highest rates of sediment remobilization occurred along the deflation corridor. The flow channelization and the increase of its speed in this point supposes a higher sediment transport which, once it reaches the depositional lobe (decrease of speed and diversification of flow) leaves by gravity the sediment transported in suspension. Thus the wind features are, as well as the control exercised by topography, the ones which generate that the place with highest wind speed is not greatly correlated with the point with highest amounts of sediment captured. Under this scenario our results allow to conclude that the area with the most important sediment transport along the experiment was between the deflation channel (remobilization area) and the depositional lobe (depositional area).

- Another point that must be added as for this relationship is the significant influence that the presence of echo-dunes and herbaceous vegetation in the outer margin has for the sediment transport along the first line. When the flow hits with these "structures" decreases its speed and consequently leaves the sediment transported by suspension on the surface. This process is highly contrasted in this work because the sediment transport recorded in the upper beach (TA) is higher than the one recorded behind the foredune strip (TB). Concluding, the results reaffirm the important role that the vegetation plays along the first line of dunes according to the control and state of conservation to the whole dune system.

- In this sense two limiting factors must be considered according to the patterns of sediment transport in the blowout studied. The limited fetch distance at the back beach supposes a small transport recorded at TA, whilst the almost non transport in the foredune strip (TB) is because of the increase of surface rugosity by the presence of embryo dunes and vegetation. Concluding, temporally speaking there is a positive correlation between strongest winds and highest amount of sediment transport. However this relation does not occur spatially-wise, where the highest amounts of sediment are not related with the points with strongest winds.

- Finally, in places like the Balearic Islands, the sand output is considered 'negative' from a management perspective, as the beach is an essential touristic and economic resource. The results of this paper suggest that the restoration of the first line of dune - foredune strip - could interfere the sand blown from the beach, and at the same time, the interaction between wind, topography, and available sediment

within the blowout, could maintain active transport patterns that result in a very dynamic blowout behaviour during short-term events.

### 7.2.3. Main conclusions

- The presence of blowouts along the first line of coastal dune systems in Mallorca and Menorca influences the aeolian dynamics as well as the patterns of sediment transport from the emerged beach to the innermost of the dune complex. This supposes that their presence can modify the geomorphological features of the whole dune system.
- Their topographic conditions and their development, perpendicular to the front dune orientation, aids the presence of corridors that help to increase the sediment transport from the emerged beach to the innermost of dune complex. These corridors suppose the wind flow channelling along the deflation basin, increasing its velocity and its power of sediment transport. Once the flow reaches the depositional lobe, it loses the static pressure by topography, decreases its speed, and increases the sedimentation capacity.
- The presence of vegetation and echo-dunes on the first line plays a very important role in relation to the aeolian dynamics and patterns of sediment transport. The increase of rugosity derived from their presence supposes lower wind velocities on the surface, which means an increase of sedimentation rates by gravity.
- Temporally speaking there is a positive correlation between sedimentation processes and energy incidence. That means that the maximum amounts of sedimentation coincide with those moments when the wind velocities are higher. However, this relation does not exist in spatial terms, because the places with the highest wind velocities do not coincide with those with higher sedimentation. In this sense we can conclude with the importance existing at the time to differentiate between processes and areas of transport and erosion (which coincide with the places of highest energy), and sedimentation processes (associated with lower energy conditions).
- As for the sediment transport two limiting factors must be highlighted; a) the short distance (fetch) of the emerged beach reduces the available amount of sand for being removed and transported. This limits the sand amount that arrives to the

foredune strip, and b) the presence of well developed foredune and herbaceous vegetation increases the rugosity along the first line of dunes, which means to interfere the sedimentary dynamics, and limiting the sand transport from the beach to the inner dune complex.

- The interaction between aeolian dynamics and the presence of blowouts along the dune fronts supposes; a) sedimentary negative balance on the emerged beach and in the inner part of the blowout (erosion basin), and b) sedimentation processes on the innermost part, where the depositional lobes are formed. This last effect enhances the sedimentary dynamism of the whole dune system.
- After results obtained in this thesis it seems highly necessary to intervene on blowouts morphologies with the aim to decrease negative balances, and to prevent sand erosion on the emerged beach. This has a lot of importance in places such as Balearic Islands where most of their economical activity grows and develops on coastal areas. The right intervention along the first line of dunes will improve the conservation state of foredune strip, enhancing the sand budget to obtain an optimum equilibrium between emerged beach and dune complex.

### **7.3. CFD Models**

- This thesis supposes the first antecedent on introducing to coastal geomorphology discipline, at both regional and national scale, CFD models for simulating the airflow interaction on coastal dune systems, and specially, on blowouts morphologies. This method, although having in perspective some improvements to increase its accuracy, presents itself as an interesting and useful tool to raise the knowledge about aeolian dynamics in these environments. Furthermore it appears as an interesting tool for simulating coming scenarios, being useful at the time to prevent potential high wind episodes, or to improve coastal management plans.



# Bibliografia

---



**BIBLIOGRAFIA**

- Almanza, L., Bolívar, F., Borrero, S., Caiafa, I., De Las Salas, K., Luque, M. G., Valdelamar, J.C. (2004). "Estudio preliminar de la comunidad macrobentónica del mesolitoral rocoso de Bahía Concha (Parque Nacional Natural Tayrona, Magdalena, Colombia) en agosto de 2002." *Acta Biológica Colombiana* 9(1): 3-9.
- Amengual, B. (1903). *La Industria de los Forasteros*. Palma de Mallorca, Muntaner.
- Baddock, M. C., Livingstone, I., Wiggs, G.F.S. (2007). "The geomorphological significance of airflow patterns in transverse dune interdunes." *Geomorphology* 87(4): 322–336.
- Baddock, M. C., Wiggs, G.F.S., Livingstone, I. (2011). "A field study of mean and turbulent flow characteristics upwind, over and downwind of barchan dunes." *Earth Surface Processes and Landforms* 36(11): 1435–1448.
- Baeza, M. J., Pastor, A., Martín, J., Ibáñez, M. (1991). "Mortalidad post-implantación en repoblaciones de *Pinus halepensis*, *Quercus ilex*, *Ceratonia siliqua* y *Tetraclinis articulata* en la provincia de Alicante." *Studia Oecologica* 8: 139-146.
- Bagnold, R. A. (1954). *The physics of blown sand and deserts dunes*. London, Methuen.
- Balaguer, P. (2002). "El coneixement científic de les costes rocoses de Mallorca (Illes Balears): estudi bibliomètric." *Bolletí de Geografia Aplicada* 3-4: 75-92.
- Balaguer, P. (2007). "Inventari quantitatiu de les costes rocoses a Mallorca". Dins: Pons, G.X., Vicens, D. (Edits.). *Geomorfologia Litoral i Quaternari. Homenatge a Joan Cuerda Barceló*. Palma de Mallorca, Mon. Soc. Hist. Nat. Balears 14: 201-230.
- Barchyn, T. E., Hugenholtz, C.H. (2012). "A new tool for modeling dune field evolution based on an accessible, GUI version of the Werner dune model." *Geomorphology* 138: 415-419.
- Barchyn, T. E., Hugenholtz, C.H. (2013). "Reactivation of supply-limited dune fields from blowouts: a conceptual framework for state characterization." *Geomorphology* 201: 172-182
- Barrere, P. (1992). "Dynamics and management of the coastal dunes of Landes, Gascony, France". Dins: Carter, R.W., Curtis, T.G. (Edits.). *Coastal dunes: geomorphology, ecology and management for conservation*. Rotterdam, Balkema: 25-32.
- Basterretxea, G., Orfila, A., Jordi, A., Fornós, J., Tintoré, J. (2007). "Evaluation of a small volume renourishment strategy on a narrow Mediterranean beach." *Geomorphology* 88: 139-151.
- Bate, G., Ferguson, M. (1996). "Blowouts in coastal foredunes." *Landscape and Urban Planning* 34: 215-224.



- Bauer, B., Sherman, J. (1999). "Coastal dune dynamics: Problems and Prospects". Dins: Goudie, A., Livingstone, I., Stokes, S. (Edits.). *Aeolian environments, sediments and landforms*. London, Wiley: 71-104.
- Bird, E. C. F. (1976). *Coasts. An introduction to systematic geomorphology*. Canberra, A.N.U. Press.
- Bird, E. C. F. (2008). *Coastal Geomorphology. An introduction*. Chichester (England), Wiley.
- Blàzquez-Salom, M. (1998). "Els usos recreatius i turístics dels espais naturals protegits. L'abast del lleure al medi natural de Mallorca." *Investigaciones Geográficas* 19: 105-126.
- Blàzquez-Salom, M., Murray, I. (2010). "Una geohistoria de la turistización de las Islas Baleares." *El periplo sustentable* 18: 69-118.
- Blott, S. J., Pye, K. (2001). "GRADISTAT: a grain size distribution and statistics package for the analysis of unconsolidated sediments." *Earth Surface Processes and Landforms* 26: 1237-1248.
- Boak, E. H., Turner, I.L. (2005). "Shoreline definition and detection: a review." *Journal of Coastal Research* 21(4): 688-703.
- Boerner, R., Forman, R. (1975). "Salt spray and coastal dune mosses." *The Bryologist* 68: 57-63.
- Boudouresque, C. F., Meinesz, A. (1982). "Découverte de l'herbier de Posidoine." *Cahiers Parc National de Port-Cros* 4: 1-79.
- Bouma, T. J., van Duren, L.A., Temmerman, S., Claverie, T., Blanco-Garcia, A., Ysebaert, T., Herman, P.M.J. (2007). "Spatial flow and sedimentation patterns within patches of epibenthic structures: combining field, flume and modeling experiments." *Estuarine, Coastal and Shelf Science* 27: 1020-1045.
- Burri, K., Gromke, C., Lehning, M., Graf, F. (2011). "Aeolian sediment transport over vegetation canopies: a wind tunnel study with live plants." *Aeolian Research* 3(2): 205-213.
- Byrne, M. L. (1997). "Seasonal sand transport through a trough blowout at Pinery Provincial Park, Ontario." *Canadian Journal of Earth Sciences* 34: 1460-1466.
- Carleton, G. (1991). "Coastal zone biodiversity Patterns." *BioScience* 41: 490-498.
- Carter, R. W., Hesp, P., Nordstrom, K.F. (1990). "Erosional landforms i coastal dunes". Dins: Nordstrom, K.F., Psuty, N.P., Carter, R.W. (Edits.). *Coastal dunes: form and processes*. London, John Wiley: 217-249.
- Clark, J. R. (1996). *Coastal zone management handbook*. Florida, CRC Press.Inc.

- Cooper, W. S. (1958). "Coastal sand dunes of Oregon and Washington." *Geological Society of America*, 72: 169.
- Cooper, W. S. (1967). *Coastal sand dunes of California*. Geological Society of America: 131.
- Criado, C. (1998). "El relieve erosivo". Dins: VVAA. *Geografía de Canarias*. Gran Canaria, Edit. Interinsular Canaria. 1: 105-142.
- Davis, J.R., Fitzgerald, R.D.M. (2004). *Beaches and Coasts*. Carlton (Australia), Blackwell Publishing.
- De Rooij-van der Goes, P. C. E. M., van der Putten, W.H., Peters, B.A.M. (1995). "Effects of sand deposition on the interaction between *Ammophila arenaria*, plant-parasitic nematodes, and pathogenic fungi." *Can. J. Bot.* 73: 1141-1150.
- Dech, J. P., Anwar Maun, M., Pazner, M.I. (2005). "Blowout dynamics on Lake Huron sand dunes: analysis of digital multispectral data from colour air photos." *Catena* 60: 165-180.
- Delgado-Fernandez, I. (2011). "Meso-scale modelling of aeolian sediment input to coastal dunes." *Geomorphology* 130: 230-243.
- Den Van Ancker, J. A. M., Jungerius, P.D. (1985). "The role of algae in the stabilization of coastal dune blowout." *Earth and surface Processes and Landforms* 10: 189-192.
- Dong, Z., Qinan, G., Lu, P., Luo, W., Wang, H. (2009). "Turbulence fields in the lee of two-dimensional transverse dunes simulated in a wind tunnel." *Earth Surface Processes and Landforms* 24: 255-270.
- Escarre, A., Martín, J. i Seva, E. (1989). *Estudio sobre el medio y la biocenosis en las arenas de la provincia de Alicante*. Alicante, Diputación Provincial de Alicante.
- Esler, A. E. (1970). "Manawatu sand dune vegetation." *Proc. N. Z. Ecological Society* 17: 41-46.
- Esteban Chapabria, V. (1999). "Dinámica litoral y sedimentación en las costas valencianas". Dins: VVAA. *Geoarqueología quaternari litoral: memorial María Pilar Fumanal*. València, Universitat de València: 331-342.
- Flor, G. (1984). "Estudio sedimentológico y morfológico de una duna costera blowout (Cabo Frouxeira, A Coruña)." *Trabajos de Geología* 14: 161-174.
- Folk, R. L., Ward, W.C. (1957). "Brazos River bar: a study in the significance of grain size parameters." *Journal of Sedimentary Petrology* 27: 3-26.
- Fornós, J., Ginés, J., Gómez-Pujol, L. (2007). *Geomorfología Litoral. Migjorn y Llevant de Mallorca*. Palma de Mallorca, Mon. Soc. Hist. Nat. Balears ,15.
- Fraile, P., Ojeda, J. (2007). "La evolución de la línea de costa de la fachada atlántica andaluza entre 1956 y 2004". Dins: Gómez-Pujol, L., Fornós, J. (Edits.). *Investigaciones*

*recientes (2005-2007) en Geomorfología Litoral*. Palma, UIB-IMEDEA-SHNB-SEG: 55-60.

- Fraser, G. S., Bennet, S.W., Olyphant, G.A., Bauch, N.J., Ferguson, V., Gellasch, C.A., Millard, C.L., Mueller, B., O'Malley, P.J., Way, N., Woodfield, M.C. (1998). "Windflow circulation patterns in a coastal dune blowout, south coast of Lake Michigan." *Journal of Coastal Research* 14: 451-460.
- Gares, P. A., Nordstrom, K.F., Psuty, N.P. (1979). *Coastal dunes: their function, delineation and management*. NJ, Center for a Coastal and Environmental Studies.
- Gares, P. A., Nordstrom, K.F. (1987). "Dynamics of a coastal foredune blowout at Island Beach State Park, NJ." *Coastal Sediments* 87: 213-221.
- Gares, P. A. (1992). "Topographic changes associated with coastal dune blowouts at Island Beach State Park, New Jersey " *Earth Surface Processes and Landforms* 17: 589-604.
- Gares, P. A., Nordstrom, K.F. (1995). "A cyclic model of foredune blowout evolution for a leeward coast: Island Beach, New Jersey." *Annals of the Association of American Geographers* 85 (1): 1-20.
- Gelabert, B., Servera, J., Rodríguez-Perea, A. (2002). "Características geomorfológicas del sistema dunar de la Bahía de Alcudia (isla de Mallorca)." *Geogaceta* 32: 209-212.
- Ginsburg, R. N., Lowenstam, H.A. (1958). "The influence of marine bottom communities on the depositional environment of the sediments." *J. Geol.* 66: 310-318.
- Glenn, M. (1979). "Glossary". Dins: McKee, E. (Edit.). *A study of global sand seas*. Washington, US Geological Surveys Professional Paper. 1052: 399-407.
- Gómez-Pujol, L., Pons, G.X. (2007). "La geomorfología litoral de Mallorca cuarenta y cinco años después". Dins: Fornós, J., Ginés, J., Gómez-Pujol, L. (Edits.). *Litoral. Migjorn i llevant de Mallorca*. Palma de Mallorca, Mon. Soc. Hist. Nat. Balears, 15: 17-37.
- Gómez-Pujol, L., Orfila, A., Álvarez-Ellacuría, A., Terrados, J., J. Tintoré (2013). "Posidonia oceanica beach-cast litter in Mediterranean beaches: a coastal videomonitoring study." *Journal of Coastal Research* SI65: 1768-1773.
- Gómez-Pujol, L., Gelabert, B., Fornós, J.J., Pardo-Pascual, J.E., Rosselló, V.M., Segura, F.S., Onac, B.P. (2013). "Structural control on the presence and carácter of calas: observation from Balearic Islands limestone rock coast macroforms". *Geomorphology* 194: 1-15-
- González-Villanueva, R., Costas, S., Duarte, H., Pérez-Arlucea, M., Alejo, I. (2011). "Blowout evolution in a coastal dune: using GPR, aerial imagery and core records." *Journal of Coastal Research* SI64: 278-282.
- Goso, C. (2006). "Aspectos sedimentológicos y estratigráficos de los depositos cuaternarios de la costa platense del departamento de canelones, Uruguay." *Latin american journal of sedimentology and basin analysis* 13 (1): 77-89.

- Guilcher, A. (1958). *Coastal and submarine morphology*. London, Methuen and Co. Ltd.
- Hails, J. R., Bennett, J.M. (1981). Wind and sediment movement in coastal dune areas. *Proceedings of 17th International Coastal Engineering Conference*. ASCE: 1565–1575.
- Harris, C. (1974). "Wind speed and sand movement in a costal dune environment." *Area* 6: 243-249.
- Hernández Calvento, L. (2002). "Análisis de la evolución del sistema de dunas de Maspalomas, Gran Canaria, Isla de Canarias (1960-2000)". *Tesis doctoral*. Departamento de Geografía. Gran Canaria, Universidad de Las Palmas de Gran Canaria: 386.
- Hesp, P. (1981). "The formation of shadow dunes." *Journal of Sedimentary Petrology* 51 (1): 101-111.
- Hesp, P. (1983). "Morphodynamics of incipient foredunes in N.S.W., Australia". Dins: Brookfield, M.E., Ahlbrandt, T.S. (Edits.). *Eolian Sediments and Processes*. Amsterdam, Elsevier: 325-342.
- Hesp, P. (1989). "A review of biological and geomorphological processes involved in the initiation and development of incipient foredunes". Dins: Gimingham, C.H., Ritchie, W., Willetts, B.B., Willis, A.J. (Edits.). *Coastal Sand Dunes. Proceedings of the Royal Society of Edinburgh*. Edingburgh, Royal Society of Edinburgh. 96B: 181-202.
- Hesp, P., Hyde, R. (1996). "Flow dynamics and geomorphology of trough blowouts." *Sedimentology*: 505-525.
- Hesp, P. (2002). "Foredunes and blowouts: initiation, geomorphology and dynamics." *Geomorphology* 48: 245-268.
- Hesp, P. A. (1996). "Flow dynamics in a trough blowout." *Boundary-Layer Meteorology* 77: 305-330.
- Hesp, P. A., Walker, I.J. (2012). "Three-dimensional aeolian dynamics within a bowl blowout during offshore winds: Greenwich Dunes, Prince Edward Island, Canada." *Aeolian Research* 3: 389-399.
- Hesp, P. A., Walker, I.J. (2013). "Coastal dunes". Dins: Shroder, J.F. (Edit.). *Treatise on Geomorphology*. San Diego, Academic Press. 11: 328-255.
- Hilton, M. J. (2006). "The loss of New Zealand's active dunes and the spread of marram grass (*Ammophila arenaria*)." *New Zealand Geographer* 62: 105-120.
- Hsu, S. A. (1977). "Boundary-layer meteorological research in the coastal zone". Dins: Walker, H.J. (Edit.). *Research Techniques in Coastal Environments*. Louisiana, Louisiana State University. 18: 99-111.
- Hugenholtz, C. H., Wolfe, S.A. (2009). "Form-flow interactions of an aeolian saucer blowout." *Earth Surface Processes and Landforms* 34: 919-928.

- Jackson, D. W. T., Beyers, J.H.M., Lunch, K., Cooper, J.A.G., Baas, A.C.W., Delgado-Fernandez, I. (2011). "Investigation of three-dimensional wind flow behaviour over coastal dune morphology under offshore winds using computational fluid dynamics (CFD) and ultrasonic anemometry." *Earth Surface Processes and Landforms* 36(8): 1113-1124.
- Jennings, J. N. (1957). "On the orientation of parabolic or U-dunes. ." *Geogr. J.* CXXIII: 474-480.
- Jungerius, P. D., Verheggen, J.T. (1981). "The development of blowouts in 'De Blink', a coastal dune area near Noordwijkerhout, The Netherlands." *Earth Surface Processes and Landforms* 6: 375-396.
- Jungerius, P. D., Verheggen, J.T., Wiggers, A.J. (1981). "The development of blowouts in 'De Blink', a coastal dune area near Noordwijkerhout, The Netherlands." *Earth Surface Processes and Landforms* 6: 375-396.
- Jungerius, P. D. (1984). "A simulation model of blowout development." *Earth Surface Processes and Landforms* 9: 509-512.
- Jungerius, P. D., van der Meulen, F. (1997). "Aeolian dynamics in relation to vegetation in a blowout complex in the Meijndel dunes, The Netherlands." *Journal of Coastal Conservation* 3: 63-70.
- Kay, R., Alder, J. (1999). *Coastal Planning and Management*. London, E and FN Spon.
- King, C. A. M. (1972). *Beaches and coasts*. London, Edward Arnold.
- King, J., Nickling, W.G., Gilles, J.A. (2008). "Investigations of the law-of-the-wall over sparse roughness elements." *Journal of Geophysical Research* 113: F02S07.
- Lancaster, N. (1986). "Dynamics of deflation hollows in the Elands Bay area, Cape Province, South Africa." *Catena* 13: 139-153.
- Landsberg, H., Riley, N.A. (1943). "Wind influences on the transportation of sand over a Michigan sand dune." *Bulletin of the University of Iowa Studies in Engineering* 27: 342-352.
- Lee, B. E., Soliman, B.F. (1977). "An investigation of the forces on three dimensional bluff bodies in rough wall turbulent boundary layers." *Journal of Fluids Engineering* 76: 503-510.
- Ley, C. (2012). "Restauración de dunas: el caso español". Dins Rodríguez-Perea, A., Pons, G.X., Roig-Munar, F.X., Martín-Prieto, J.A., Mir-Gual, M. i Cabrera, J.A. (Edits.). *La gestión de playas y dunas: experiencias en Latinoamérica y Europa*. Mon. Soc. Hist. Nat. Balears, 19: 141-157.

- Livingstone, I., Bullard, J.E., Wiggs, G.F.S., Thomas, D.S.G. (1999). "Grain-size variation on dunes in the Southwest Kalahari, southern Africa." *Journal of Sedimentary Petrology* 69: 546–552.
- Lynch, K., Jackson, D.W.T., Cooper, J.A.G. (2008). "Aeolian fetch distance and secondary airflow effects: the influence of micro-scale variables on meso-scale foredune development." *Earth Surface Processes and Landforms* 105: 991–1005.
- Lynch, K., Jackson, D.W.T., Cooper, J.A.G. (2010). "Coastal foredune topography as a control on secondary airflow regimes under offshore winds." *Earth Surface Processes and Landforms* 35(3): 344-353.
- Marquès, M. A., Julià, R. (2005). "Evolució de la zona litoral del Empordà durant el últim mil·lenni". Dins: Sanjaume, E., Mateu, J. (Edits.). *Geomorfologia litoral i quaternari. Homenatge al professor Viçenc M. Rosselló Verger*. València, Universitat de València: 259-272.
- Martín-Prieto, J. A., Roig-Munar, F.X., Rodríguez-Perea, A. (2007). "Análisis espacio-temporal (1956-2005) de la foredune de Mesquida (N Mallorca) mediante el uso de variables geoambientales y antrópicas". Dins: Gómez-Pujol, L., Fornós, J. (Edits.). *Investigaciones Recientes (2005-2007) en Geomorfología Litoral*. Palma de Mallorca, SHNB, UIB, IMEDEA, SEG: 137-140.
- Martín-Prieto, J. A., Roig-Munar, F.X., Pons, G.X., Rodríguez-Perea, A. (2008). "Análisis de las variaciones de la línea de costa en sistemas playa-duna de Menorca y de Mallorca (Illes Balears)". Dins: Benavente, J., Gracia, F.J. (Edits.). *Trabajos de Geomorfología en España, 2006 – 2008. X Reunión Nacional de Geomorfología*. Cádiz, SEG-UCA.
- Martín-Prieto, J. A., Roig-Munar, F.X., Pons, G.X., Rodríguez-Perea, A. (2009). "La foredune como elemento estabilizador en sistema playa-duna". Dins: Morales, J.A., Cantado, M., Rodríguez, A. i Delgado I. (Edits.) *Nuevas contribuciones sobre geomorfología litoral*. Huelva, Universidad de Huelva: 45-48.
- Martín-Prieto, J. A., Espinosa, J., Roig-Munar, F.X., Vericad, M., Rodríguez-Perea, A., Torres, N., Pons, G.X., Mir-Gual, M. (2011). "Descripció del sistema dunar d'es Codolar (Eivissa, Illes Balears)." *Boll. Soc. Hist. Nat. Balears* 54: 183-195.
- Martín-Prieto, R.-M., F.X., Rodríguez-Perea, A., Pons, G.X. (2010). "Evolució de la línia de costa de la platja des Trenc". Dins: Mayol, J., Muntaner, Ll., Rullan, O. (Edits.). *Homenatge a Bartomeu Barceló i Pons, geògraf*. Palma, Lleonard Muntaner, Editor: 423-440.
- Massutí, E., Grau-Jofre, A., Duarte, C., Terrados, J., Marbà, N. (2000). *La posidònia: l'alga que no és*. Palma de Mallorca, Quaderns de Pesca.
- Mir-Gual, M. (2009). "Modificaciones del perfil de playas en las Islas Baleares (Playas de Can Picafort y Es Comú de Muro)." *Investigaciones Geográficas* 50: 191-207.

- Mir-Gual, M. (2011). "Dinàmica, caracterització i gestió del sector litoral Can Picafort - Es Comú de Muro (Badia d'Alcúdia, Mallorca)". *Memòria d'Investigació*. Departament de Ciències de la Terra, Universitat de les Illes Balears. Palma: 302.
- Mir-Gual, M., Fraga, P., Pons, G.X., Roig-Munar, F.X., Martín-Prieto, J.A., Rodríguez-Perea, A., Brunet, P.J. (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., Pons, G.X. (2011). "Coast sandy strip fragmentation of a protected zone in the N of Mallorca (Western Mediterranean)." *Journal of Coastal Research* SI64 (1): 1367-1371.
- Mir-Gual, M., Pons, G.X., Perelló, B., Roig-Munar, F.X., Martín-Prieto, J.A., Rodríguez-Perea, A. (2011). "Caracterització i dinàmica del sistema platja-duna d'es Comú de Muro (Badia d'Alcúdia, Mallorca)." *Boll. Soc. Hist. Nat. Balears* 54: 95-116.
- Mir-Gual, M., Pons, G.X., Martín-Prieto, J.A., Roig-Munar, F.X., Rodríguez-Perea, A. (2011a). "Estudio ecológico de un frente dunar como indicador cualitativo de su estado de conservación. Playa de es Comú de Muro (Mallorca, Islas Baleares)". Dins: Rodríguez, I., Sánchez Garcia, M.J., Montoya, I. (Edits.). *Actas de las VI Jornadas de Geomorfología Litoral*. Tarragona: 111-114.
- Mir-Gual, M., Pons, G.X., Roig-Munar, F.X., Martín-Prieto, J.A., Rodríguez-Perea, A. (2012). "Estudio preliminar del estado de fragmentación del frente dunar de Cala Agulla (Mallorca, Islas Baleares). Estudio piloto para la caracterización de formas erosivas blowout en los sistemas dunares de las Islas Baleares". Dins: Barragán-Muñoz, J. (Edit.). *Libro de Comunicaciones del I Congreso Iberoamericano de Gestión Integrada de Áreas Litorales*. Cádiz, UCA: 612-621.
- Mir-Gual, M., Roig-Munar, F.X., Pons, G.X., Martín-Prieto, J.A., Rodríguez-Perea, A. (2012a). "Modelo teórico para la definición de curvas de sensibilidad litorales. Comparativa entre los sistemas playa-duna mediterráneos y caribeños". Dins: González-Díez (Edit.). *Avances de la Geomorfología en España 2010-2012. Actas de la XII Reunión Nacional de Geomorfología*. Santander, Universidad de Cantabria: 375-378.
- Mir-Gual, M., Pons, G.X., Roig-Munar, F.X., Martín-Prieto, J.A. (2012b). "La Ley de Costas española: de su revisión a su grado de aplicación". Dins: Rodríguez-Perea, A., Pons, G.X., Roig-Munar, F.X., Martín-Prieto, J.A., Mir-Gual, M. i Cabrera, J.A. (Edits.). *La gestión de playas y dunas: experiencias en Latinoamérica y Europa*. Mon. Soc. Hist. Nat. Balears, 19: 105-122
- Mir-Gual, M., Pons, G.X., Martín-Prieto, J.A., Roig-Munar, F.X., Rodríguez-Perea, A. (2013). "Geomorphological and ecological features of blowouts in a western Mediterranean coastal dune complex: a case study of the Es Comú de Muro beach-dune system on the island of Mallorca, Spain." *Geo-Marine Letters* 33: 129-141.
- Mir-Gual, M., Roig-Munar, F.X., Pons, G.X., Gelabert, B., Martín-Prieto, J.A., Rodríguez-Perea, A. (en revisió). "Airflow and patterns of sediment transport in a trough blowout under medium-fresh breeze wind conditions". *Geologica Acta*.

- Moore, L. J. (2000). "Shoreline Mapping Techniques." *Journal of Coastal Research* 16: 111-124.
- Moore, L. J., Griggs, G.B. (2002). "Long-term cliff retreat and erosion hotspots along the central shores of the Monterrey BaY National Marine Sanctuary." *Marine Geology* 181: 265-283.
- Morton, R. A. (1991). "Accurate Shoreline Mapping: Past, Present, and Future". *Proceedings of the Coastal Sediments*. Seattle, Washington, American Society of Civil Engineers: 997-1010.
- Murray, I. (2005). "Huellas en la playa de s'Arenal. La huella del impacto humano sobre la T(t)ierra y en las Islas Baleares". Dins: Cabero-Diéguez, V., Espinoza-Guerra, L.E. (Edits.). *Sociedad y medio ambiente: ponencias presentadas en las segundas jornadas "Sociedad y medio ambiente"*. Salamanca, Universidad de Salamanca: 197-250.
- Nickling, W. G., Davidson-Arnott, R.G.D. (1990). "Aeolian sediment transport on beaches and coastal dunes". Dins: Davidson-Arnott, R. (Edit.). *Proceedings of the Symposium on Coastal Sand Dunes*. Ottawa, National Research Council of Canada: 1-35.
- Nickling, W. G., McKenna Neuman, C. (1999). "Recent investigations of airflow and sediment transport over desert dunes". Dins: Goudie, A.S., Livingstone, I., Stokes, S. (Edits.). *Aeolian Environments, Sediments and landforms*. Chichester, John Wiley & Sons: 15-47.
- NOAA, C. S. C. (2004). Coastal Surveys Maps.
- Nonn, H. (1987). *Geografía de los litorales*. Madrid, Akal.
- Nordstrom, K. F. (2000). *Beaches and dunes of developed coasts*. Cambridge, Cambridge University Press.
- Nordstrom, K. R., Jackson, N.L., Klein, A.H.F., Sherman, D.J., Hesp, P.A. (2006). "Offshore aeolian transport across a low foredune on a developed barrier island." *Journal of Coastal Research* 22(5): 1260-1267.
- OCDE (1995). *Gestión de zonas costeras. Políticas integradas*. Madrid, Ediciones Mundiprensa.
- Ojeda, J. (2000). "Métodos para el cálculo de la erosión costera. Revisión, tendencias y propuesta." *Boletín de la A.G.E* 30: 103-118.
- Ojeda Zújar, J., Álvarez-Francoso, J. I., Martín, D., Fraile, P. (2009). "El uso de las tecnologías de la información geográfica para el cálculo del índice de vulnerabilidad costera (CVI) ante una potencial subida del nivel del mar en la costa andaluza (España)." *GeoFocus* 9: 83-100.



- Oliveras, I., Martínez-Vilalta, J., Jimenez-Ortiz, T., Lledó, M.J., Escarré, A., Piñol, J. (2003). "Hydraulic properties of *Pinus halepensis*, *Pinus pinea* and *Tetraclinis articulata* in a dune ecosystem of Eastern Spain." *Plant Ecology* 169: 131-141.
- Olson, J. S. (1958). "Lake Michigan dune development. I. Wind velocity profiles." *Journal of Geology* 66: 254–263.
- Ortuño, F. (1990). "El plan para la repoblación forestal de España del año 1939. Análisis y comentarios." *Ecología* 1: 373-392.
- Pastor-López, A. i. M.-M., J. (1993). "Los bosques protectores de *Pinus halepensis* en la provincia de Alicante. Características de un proceso de revegetación." *Mediterránea Series de Estudios Biológicos* 14: 57-58.
- Patriquin, D. G. (1975). "'Migration" of blowouts in seagrasses beds at Barbados and Carriacou, West Indies, and its ecological and geological implications." *Aquatic Botany* 1: 163-189.
- Pattanapol, W., Wakes, S.J., Hilton, M. (2011). "Using computational fluid dynamics to determine suitable foredune morphologies in New Zealand." *Journal of Coastal Research* SI(64): 298–302.
- Pethick, J. (2001). *An introduction to Coastal Geomorphology*. United States, Edward Arnold Publishers.
- Pluis, J. L. A. (1992). "Relationships between deflation and near surface wind velocity in a coastal dune blowout." *Earth Surface Processes and Landforms* 17: 663-673.
- Pons, G.X., Vicens, D. (2007). *Geomorfologia Litoral i Quaternari*. Palma, Mon. Soc. Hist. Balears: 14.
- Pye, K., Tsoar, H. (1990). *Aeolian sand transport and sand dunes*. Berlin, Springer.
- Pye, K. (1993). "Late Quaternary development of coastal parabolic megadune complexes in northeastern Australia". Dins: Pye, K., Lancaster, N. (Edits.) *Aeolian Sediments: Ancient and Modern*. International Association of Sedimentologists, Special Publication. 16: 23-44.
- Quézel, P., Médail, F. (2003). *Écologie et biogéographie des forêts du bassin méditerranéen*. París, Elsevier.
- Quintana, A. (1978). "Actividades económicas y urbanización en Mallorca." *Trabajos de geografía* 34: 93-128.
- Ramírez Souto, O., Candela Pérez, J. (2003). "Respuesta del nivel del mar al forzamiento atmosférico en las costas del Golfo de México." *Serie Oceanológica* 1: 76-84.
- Rasmussen, K. R. (1989). "Some aspects of flow over coastal dunes". Dins: Gimingham, C.H., Ritchie, W., Willetts, B.B., Willis, A.J. (Edits.) *Coastal Sand Dunes. Proceedings of the Royal Society of Edinburgh* 96B: 129–147.

- Ricklefs, R. E., Schluter, D. (1993). *Species diversity in ecological communities. Historical and geographical perspectives*. Chicago, The University of Chicago.
- Ritchie, W. (1972). "The evolution of coastal sand dunes." *Scottish Geographical Magazine* 88: 19-35.
- Rodríguez-Perea, A., Servera, J., Martín-Prieto, J.A. (2000). *Alternatives a la dependència de les platges de les Balears de la regeneració artificial continuada: informe Metadona*. Palma de Mallorca, Universitat de les Illes Balears.
- Rodríguez-Perea, A., Pons, G.X., Roig-Munar, F.X., Martín-Prieto, J.A., Mir-Gual, M., Cabrera, J.A. (2012). *La gestión de playas y dunas: experiencias en Latinoamérica y Europa*. Palma, Mon. Soc. Hist. Nat. Balears.
- Roig-Munar, F. X., Martín-Prieto, J.A. (2003). "El papel protector de las bermas vegetales de Posidonia oceanica sobre la playa emergida d'es Perengons (Mallorca)". Blanco Chao, R., López Bedoya, J., Pérez Alberti, A. (Edits.). *Procesos Geomorfológicos y Evolucion Costera: Actas de La II Reunion de Geomorfología Litoral*. Santiago de Compostela, Universidad de Santiago de Compostela.
- Roig-Munar, F. X. (2004). "Análisi y consecuencias de la modificación artificial del perfil de playa-duna provocado por el efecto mecánico de su limpieza." *Investigaciones Geográficas* 33: 87-103.
- Roig-Munar, F. X. (2011). "Aplicació de criteris geomorfològics en la gestió dels sistemes litorals arenosos de les Illes Balears". *Tesi doctoral*. Departament de Ciències de la Terra, Universitat de les Illes Balears. Palma de Mallorca: 413.
- Roig-Munar, F. X., Martín-Prieto, J.A. (2005). "Efectos de la retirada de bermas vegetales de Posidonia oceanica sobre playas de las Islas Baleares: consecuencias de la presión turística." *Investigaciones Geográficas, Boletín del Instituto de Geografía, UNAM* 57: 40-52.
- Roig-Munar, F. X., Comas Lamarca, E. (2005). Propuestas de un modelo de clasificación para las playas de las Islas Baleares mediante el análisis de variables de uso, estado y gestión. *Boletín de la A.G.E.* 40: 429-448.
- Roig-Munar, F. X., Martín-Prieto, J.A., Comas Lamarca, E., Rodríguez-Perea, A. (2006). "Space-Time (1956-2004) of human use and management of the Beach-Dune Systems of Menorca (Balearic Islands, Spain)" *Journal Coastal Research* SI48: 111-117.
- Roig-Munar, F. X., Martín-Prieto, J.A., Fraga Arguimbau, P. (2007). "Descripció del sistema dunar de Cala en Carbó (NW Menorca, Illes Balears). Description of the dune system of Cala en Carbó (NW Minorca, Balearic Islands)." *Boll. Soc. Hist. Nat. Balears* 50: 77-85.
- Roig-Munar, F. X., Martín-Prieto, J.A., Fraga Arguimbau, P., Pons, G.X., Rodríguez-Perea, A., Gelabert, B. (2008). "Descripció del sistema dunar de sa Marina de s'Arena (Nord de Menorca, Illes Balears)." *Boll. Soc. Hist. Nat. Balears* 51: 103-115.

- Roig-Munar, F. X., Martín-Prieto, J.A., Fraga Arguimbau, P., Pons, G.X., Rodríguez-Perea, A. (2008a). "Descripció del sistema dunar de l'Arenal de Sant Jordi (cala'n Calderer, N de Menorca, Illes Balears)." *Boll. Soc. Hist. Nat. Balears* 51: 117-129.
- Roig-Munar, F. X., Rodríguez-Perea, A., Martín-Prieto, J.A., Pons, G.X. (2009). "Soft management of beach-dune systems as a tool for their sustainability." *Journal of Coastal Research* SI56: 1284-1288.
- Roig-Munar, F. X., Rodríguez-Perea, A., Pons, G.X., Martín-Prieto, J.A. (2009a). "Análisis de técnicas de gestión litoral en las Islas Baleares (España) mediante su valorización geoambiental y económica." *Revista del medio ambiente, turismo y sustentabilidad* 2 (2): 57-66.
- Roig-Munar, F. X., Fraga I Arguimbau, P., Martín-Prieto, J.A., Pons, G.X., Rodríguez-Perea, A. (2009b). "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.
- Roig-Munar, F. X., Martín-Prieto, J.A., Rodríguez-Perea, A., Mir-Gual, M., Pons, G.X. (2011). "La gestión ambiental de los sistemas playa-duna: el caso de las Islas Baleares". Dins: Sanjaume, E., Gracia-Prieto, F.S. (Edits.). *Las dunas en España*. Cádiz, Sociedad Española de Geomorfología: 683-699.
- Roig-Munar, F. X., Martín-Prieto, J.A., Rodríguez-Perea, A., Pons, G.X., Mir-Gual, M., (2012). "Alternativas ambientales en la gestión de playas y sistemas dunares en las Islas Baleares". Dins: Rodríguez-Perea, A., Pons, G.X., Roig-Munar, F.X., Martín-Prieto, J.A., Mir-Gual, M., Cabrera, J.A. (Edits.) *La gestión de playas y dunas: experiencias en Latinoamérica y Europa*. Palma, Mon. Soc. Hist. Nat. Balears. 19: 77-91.
- Roig-Munar, F. X., Martín-Prieto, J.A., Rodríguez-Perea, A., Pons, G.X., Mir-Gual, M. (2012). "Risk assessment of beach-dune system erosion: beach management impacts on the Balearic Islands." *Journal of Coastal Research* 28(6): 1488-1499.
- Romine, B. M., Fletcher, C.H., Frazer, L.N., Genz, A.S., Barbee, M.M., Lims, S.C. (2009). "Historical shoreline change, southeast Oahu, Hawaii; applying polynomial models to calculate shoreline change rates." *Journal of Coastal Research* 25(6): 1236-1253.
- Rotnicka, J. (2013). "Aeolian vertical mass flux profiles above dry and moist sandy beach surfaces." *Geomorphology* 187: 27-37.
- Rullan, O. (1999). "Crecimiento y política territorial en las Islas Baleares (1955-2000)." *Estudios Geográficos* 60 (236): 403-442.
- Rullan, O. (2002). *La construcció territorial de Mallorca*. Palma de Mallorca, Editorial Moll.
- Rullan, O. (2007). *L'ordenació territorial a les Balears (s. XIX-XX)*. Palma de Mallorca, Edicions Documenta Balear.
- Sanjaume Saumell, E., Gracia Prieto, J. (2011). *Las dunas en España*. Cádiz, SEG.

- Servera, J. (1997). "Els sistemes dunars litorals de les Illes Balears". *Tesi doctoral*. Departament de Ciències de la Terra, Universitat de les Illes Balears. Palma: 904.
- Servera, J. (2003). "Los sistemas playa-duna holocenos y actuales de Menorca". Dins: Rosselló, V.M., Fornós, J.J., Gómez-Pujol, L (Edits.). *Introducción a la Geografía Física de Menorca*. Palma, Mon. Soc. Hist. Nat. Balears 10: 123-137.
- Servera, J. (2003a). "El sistema playa-duna de Cala Tirant". Dins: Rosselló, V.M., Fornós, J.J., Gómez-Pujol, L (Edits.). *Introducción a la Geografía Física de Menorca*. Palma, Mon. Soc. Hist. Nat. Balears 10: 143-156.
- Servera, J. (2004). *Geomorfología del Litoral de les Illes Balears*. Palma de Mallorca, Edicions Documenta Balear.
- Servera, J., Riquelme, J. (2004). "L'acció del vent: sistemes dunars actuals i eolianites". Dins: Fornós, J.J., Obrador, A., Rosselló, V.M. (Edit.). *Història natural del Migjorn de Menorca. El medi físic i l'influx humà*. Maó, Institut Menorquí d'Estudis: 213-234.
- Servera, J., Rodríguez-Perea, A., Martín-Prieto, J.A. (2007). "Los sistemas playa – duna en las Baleares". Dins: Fornós, J. J., Ginés, J., Gómez-Pujol, L. (Edits.). *Geomorfología Litoral. Migjorn i llevant de Mallorca*. Palma, Mon. Soc. Hist. Nat. Balears 15: 61-74.
- Servera, J., Rodríguez-Perea, A., Martín-Prieto, J.A. (2007a). "El sistema playa-duna de Es Trenc (Bahía de Campos)". *Geomorfología Litoral. Migjorn i llevant de Mallorca*. Palma, Mon. Soc. Hist. Nat. Balears 15: 105-118.
- Smith, H. T. U. (1960). Physiography and photo interpretation of coastal sand dunes. Final report Contract NONR - 2242(00), Office of Naval Research, Geographical Branch: 60.
- Smith, M. J., Cromley, R.G. (2006). Coastal survey maps: from historical documents to digital databases. UCCGIA Papers and Proceedings. Connecticut, University of Connecticut. Center for Geographic Information and Analysis.
- Smyth, T. A. G., Jackson, D.W.T., Cooper, J.A.G. (2011). "Computational fluid dynamic modelling of three-dimensional airflow over dune blowouts." *Journal of Coastal Research* SI64(1): 314-318.
- Smyth, T. A. G., Jackson, D.W.T., Cooper, J.A.G. (2012). "High resolution measured and modelled three-dimensional airflow over a coastal bowl blowout." *Geomorphology* 177-178: 62-73.
- Smyth, T. A. G., Jackson, D.W.T., Cooper, J.A.G. (2013). "Three dimensional airflow patterns within a coastal blowout during fresh breeze to hurricane force winds." *Aeolian Research* 9: 111-123.
- Soledispa, B. (2007). "Características de las sedimentación marina litoral comprendida entre la Puntilla de Santa Elena y Punta Ancón, provincia de Santa Elena, Ecuador." *Acta Oceanográfica del Pacífico* 14: 181-188.
- Steers, J. A. (1964). *The coastline of England and Wales*, Cambridge, Cambridge University Press.

- Strahler, A. N., Strahler, A. H. (1989). *Geografía Física*. Barcelona, Ediciones Omega.
- Suàrez de Vivero, J. L. (1999). "Delimitación y definición del espacio litoral". Dins: Viciana, A., Martínez-Lage, Galan Pedregosa, A (Edits.). *Actas de las Jornadas sobre el litoral de Almería: caracterización, ordenación y gestión de un espacio geográfico*. Almería: 13-23.
- Thieler, E. R., Himmelstoss, E.A., Zichichi, J.L., Ergul, A. (2009). *Digital Shoreline Analysis System (DSAS) version 4.0. An ArcGIS extension for calculating shoreline change, U.S. Geological Survey Open-File Report 2008-1278*.
- Tsoar, H. (1978). *The dynamics of longitudinal dunes. Final Technical Report*. London, U.S. Army European Research Office: 172.
- Tsoar, H. (1982). "Internal structure and surface geometry of longitudinal (seif) dunes." *Journal of Sedimentary Petrology* 52: 823–831.
- Tsoar, H. (1985). "Profile analysis of sand dunes and their steady state significance." *Geografiska Annaler* 67A: 47–59.
- Vasquez, J., Camus, P., Ojeda, F. (1998). "Diversidad, estructura y funcionamiento de ecosistemas costeros rocosos del norte de Chile." *Revista Chilena de Historia Natural* 71: 479-499.
- Viñals, M. J. (1999). "Los variabilidad de las cubetas de los humedales mediterráneos: formas y procesos geomórficos." *Humedales Mediterráneos* 1: 91-98.
- Vizcaino, A. (2001). *Erosión costera en Almería (1957-1995)*. Almería, Instituto de estudios almerienses.
- Walker, I. J., Hesp, P.A., Davidson-Arnott, R.G.D., Ollerhead, J. (2006). "Topographic steering of alongshore airflow over a vegetated foredune: Greenwich Dunes, Prince Edward Island, Canada." *Journal Coastal Research* 22(5): 1278–1291.
- Yakhot, V., Orszag, S.A., Thangam, S., Gatski, T.B., Speziale, C.G. (1992). "Development of turbulence models for shear flows by a double expansion technique." *Physics of Fluids* 4(7): 1510-1520.

# Annex

---



**ANNEX****ÍNDEX****Articles directament relacionats amb la tesi doctoral i els seus resultats**

**Mir-Gual, M.** i Pons, G.X. (2011). “Coast sandy strip fragmentation of a protected zone in the N of Mallorca”. *Journal of Coastal Research*, SI64 (II): 1367-1371.

**Mir-Gual, M.**, Pons, G.X., Martín-Prieto, J.A., Roig-Munar, F.X. i Rodríguez-Perea, A. (2013). “Geomorphological and ecological features of blowouts in a western Mediterranean coastal dune complex: a case study of the Es Comú de Muro beach-dune system on the island of Mallorca, Spain”. *Geo-Marine Letters*, 33: 129-141.  
<http://link.springer.com/article/10.1007%2Fs00367-012-0298-7>

**Altres articles indirectament relacionats amb la tesi doctoral**

Roig-Munar, F.X., Martín-Prieto, J.A., Rodríguez-Perea, A., Pons, G.X., **Mir-Gual, M.** (2012). “Risk assessment of beach-dune system erosion: beach management impacts on the Balearic Islands”. *Journal of Coastal Research*, 28 (6): 1488-1499.  
<http://www.jcronline.org/doi/abs/10.2112/JCOASTRES-D-11-00187.1>

Martin-Prieto, J.A., Roig-Munar, F.X., Pons, G.X., Rodríguez-Perea, A., Alvarado, M., **Mir-Gual, M.** (2013). “Description of erosion processes in Spratt Bight (San Andrés island, Colombia) using Sequential End Point Rates (EPR)”. *Journal of Coastal Research*, SI65 (I): 997-1002.  
[http://ics2013.org/papers/Paper3789\\_rev.pdf](http://ics2013.org/papers/Paper3789_rev.pdf)

Roig-Munar, F.X., **Mir-Gual, M.**, Rodríguez-Perea, A., Pons, G.X., Martín-Prieto, J.A., Gelabert, B., Blázquez-Salom, M. (2013). “Beaches of Ibiza and Formentera (Balearic Islands): a classification based on their environmental features, tourism use and management”. *Journal of Coastal Research*, SI65 (II): 1844-1849.  
[http://ics2013.org/papers/Paper4463\\_rev.pdf](http://ics2013.org/papers/Paper4463_rev.pdf)



