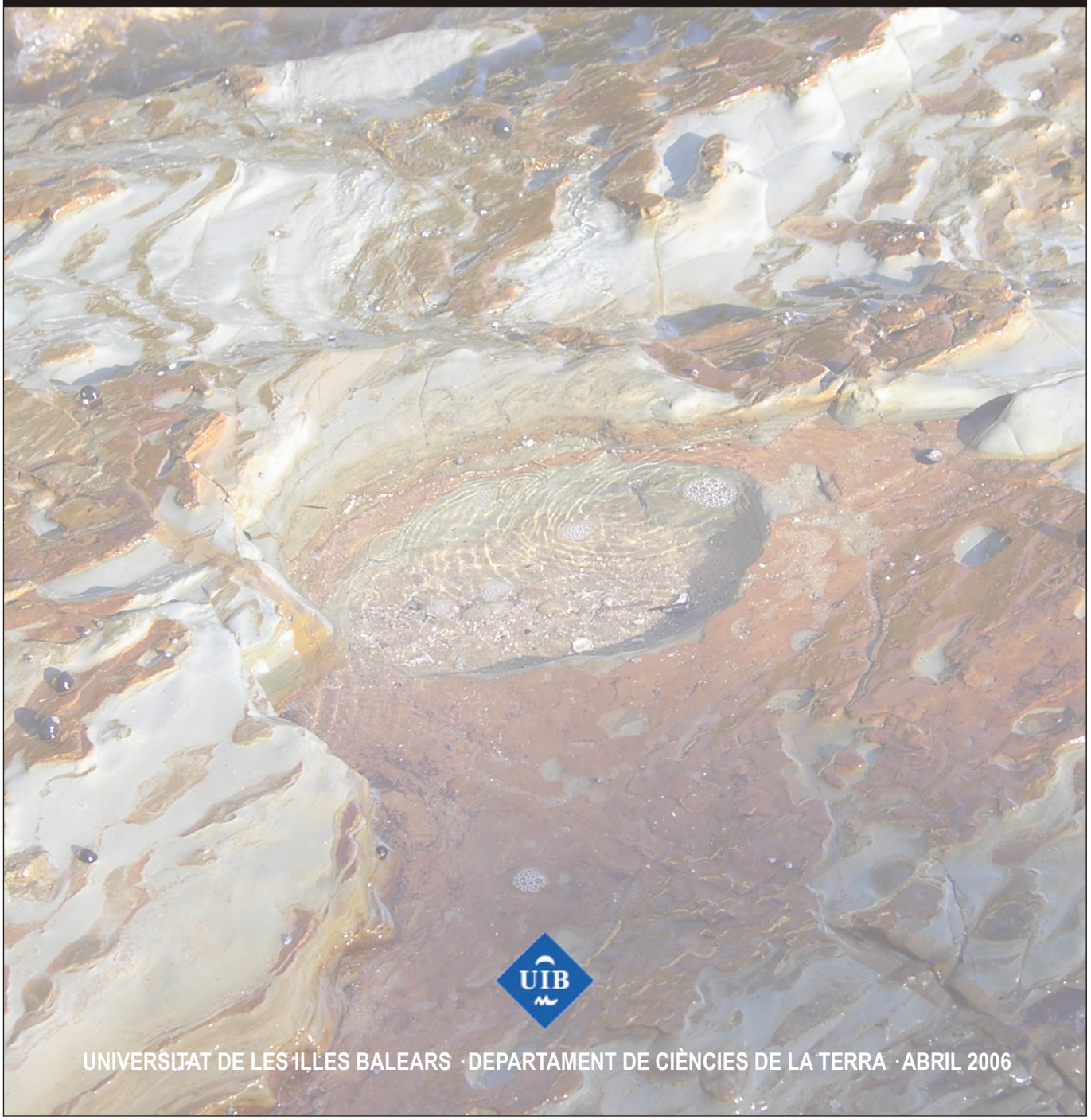
Lluís GÓMEZ-PUJOL

Patrons, taxes i formes d'erosió a les costes rocoses carbonatades de Mallorca



UNIVERSITAT DE LES ILLES BALEARS · DEPARTAMENT DE CIÈNCIES DE LA TERRA · ABRIL 2006

Departament de Ciències de la Terra
Universitat de les Illes Balears

PATRONS, TAXES I FORMES D'EROSIÓ A LES COSTES ROCOSES CARBONATADES DE MALLORCA

Lluís Gómez-Pujol

El doctorand: Vist-i-plau del director :

Dr. Joan J. Fornós i Astó

Ciutat de Mallorca
Abril 2006

Presentació

– *Em sembla que sóc el primer –va dir tot saludant-lo amb una mica més de respecte que el que hom solia atorgar a aquell bon jan.*
– *És natural –va contestar el senyor De Bargeton.*

Lucien va creure que aquesta frase era un epigrama de marit gelós i es posa vermell i es mirà al mirall per recuperar la serenitat.

– *Viviu a Homeu –va dir el senyor De Bargeton– i les persones que viuen lluny sempre arriben més d'hora que les que viuen a prop.*
– *I què ho fa això? –va preguntar Lucien fent un posat agradable.*
– *No ho sé pas –va contestar el senyor De Bargeton, i va retornar a la seva immobilitat.*
– *És perquè ho heu esbrinat –va reprendre Lucien–. Un home capaç de fer l'observació pot torbar-ne la causa.*
– *Ah! –exclamà el senyor De Bargeton–. Les causes finals! Ai, ai...!*

Honoré de Balzac
(Les il·lusions perdudes, 1837)

Com passa amb els personatges de la comèdia humana de Balzac, aquesta memòria pateix del mal de l'ambició, de més a més de la dèria de perseguir les causes finals. El marc, les costes rocoses i, pel determinisme geogràfic, el rocam carbonatat! La resta, les circumstàncies...

Els processos i les formes relacionades amb l'alteració del rocam carbonatat són una línia de recerca ben consolidada, amb contribucions ben significatives, al Departament de Ciències de la Terra de la Universitat de les Illes Balears. D'ençà d'uns anys enrere, en aquesta línia de treball s'hi afegeix la curolla pels processos costaners de les costes rocoses, tant des d'un vessant evolutiu com des d'un vessant dinàmic. És, doncs, a la cruïlla d'aquestes dues línies de recerca on s'ha d'ubicar la present memòria.

El tema del treball, els patrons, les taxes i les formes d'erosió de les costes rocoses carbonatades, neix de l'experiència adquirida en el decurs del projecte de recerca europeu *European Shore Platform Erosion Dynamic*s, que a Mallorca dirigia el director de la tesi, Dr. Joan J. Fornós. Les costes rocoses, d'una banda per la dificultat que suposa accedir-hi i d'una altra per la complexitat dels fenòmens que s'hi donen –que no són gens senzills de simplificar en termes físics–, no són un medi que, en el camp de la geomorfologia, gaudeixi d'una tradició dilatada. No obstant això, d'un temps ençà hi ha un interès renovat que es tradueix en un degotís de publicacions a nivell internacional. Tanmateix, la recerca sobre les formes i la morfodinàmica de la costa rocosa quasi bé sempre és parcial. Els treballs fan referència a la geometria dels penya-segats, a l'efecte de la meteorització per sals, als processos bioerosius o al paper de la història geològica o a les oscil·lacions del nivell marí durant el Quaternari. Només Trudgill (1976a) i trenta anys enrere, intenta aclarir la contribució dels diferents processos i agents de meteorització a les costes rocoses carbonatades de l'illa oceànica d'Aldabra. El repte, doncs, era adquirir un coneixement semblant pel que feia a Mallorca i, de més a més, intentar relacionar el paper de cada un dels processos en la formació i organització del microrelleu present a les costes rocoses de Mallorca. Els primers dubtes sorgiren a l'hora de dissenyar l'abast geogràfic de la tesi, les localitats per mostrejar i què mostrejar. Encara avui, existeix el corcó de si calia un mostratge intens a una sola localitat, o bé si convenia avaluar els processos a un espectre ampli de litologies i localitats. No cal dir que cada un dels criteris té els seus avantatges i els seus inconvenients. Finalment, decidírem adoptar el segon criteri, tot i que en el cas concret de s'Alavern, sense arribar a un mostratge exhaustiu, s'intentà d'obtenir el màxim d'informació. Net i clar, arribà a pesar més la possibilitat d'avaluar la capacitat de treballar diferents aspectes de la morfodinàmica de les costes rocoses, que no tancar l'operativa d'un procés o d'un agent en concret.

Així doncs i amb aquest rerefons, la tesi s'estructura en dos blocs. El primer està dedicat als patrons i a les taxes d'erosió i meteorització i el segon a les formes de relleu resultants. En el primer es persegueix aclarir quines són les magnituds de les taxes d'erosió a la costa rocosa, mitjançant diferents tècniques instrumentals. Així, per exemple, la denudació total es quantifica

amb micròmetres de dial mòbil i l'escàner làser, dues tècniques diferents per contrastar si els resultats són semblants o no ho són, si es pot confiar o no es pot confiar en la informació que se'n deriva. El mateix passa amb la confrontació dels resultats dels tests d'exposició de peces de roca i l'estudi de l'alveolització de les façanes del patrimoni arquitectònic històric. Per tant, aquest primer bloc no té una naturalesa descriptiva o regional. Es persegueix avaluar la capacitat de quantificar els processos i que la informació que se'n derivi sigui significativa. Per aquest motiu, en relació a cada experiment es descriuran les localitats d'estudi i els aspectes metodològics necessaris per a la comprensió dels resultats. El paper de la bioerosió a les costes rocoses de les Balears es fa evident fins i tot per a un observador inexpert, d'aquí l'extens capítol que es dedica a la distribució dels organismes i la quantificació de les taxes dels principals organismes brostejadors als perfils estudiats.

El segon bloc malda per caracteritzar les formes del microrelleu calcari i la seva distribució, així com relacionar la informació relativa als processos del bloc anterior, amb els agents i els processos dominants en el *karren litoral*. Si el primer bloc considerava els processos per ells mateixos, i no en funció de les localitats i del marc regional, el segon sí que gaudeix d'aquesta component que permet considerar factors com la història geològica o la fracturació, entre d'altres, en la formació del relleu litoral.

Pel que fa al marc geogràfic de la tesi, el títol fa referència explícita a Mallorca, però el lector crític hi trobarà experiments i descripcions relatives a altres localitats. Resultava impossible no contrastar les nostres troballes a d'altres indrets i sobre altres litologies. Així arran de les dues estades que realitzàrem a la *University of Melbourne*, a redós del mestratge del Dr. Wayne J. Stephenson, s'avaluà el fenomen de bombament de la superfície rocosa sobre substrats siliciclàstics. De la mateixa manera, la participació en les campanyes del projecte d'investigació, a propòsit de les interferències entre els sistemes fluvial, càrstic i litoral del Migjorn de Menorca, feia inevitable contrastar i aplicar el model del *karren litoral* desenvolupat a Mallorca, a les costes menorquines.

Era massa ambiciós voler respondre tantes preguntes, tantes causes finals. Tancam la present memòria conscients que hauria pogut ésser molt més d'allò que és, però les ramificacions són infinites. Aspectes sobre els quals hem treballat, ben interessants i que mereixen una tesi just per a ells sols, com és el cas de les plataformes litorals, la presència dels microsolcs o els conductes de subsòl s'han deixat fora de la tesi. S'havia d'escapçar per alguna banda. Així doncs, aquesta memòria és un document amb poques respostes i moltes preguntes, però la informació que presenta obri noves línies a partir de les quals treballar i millorar el nostre coneixement sobre la morfodinàmica de les costes rocoses, en especial de les carbonatades.

Agraïments

Arriba el moment de cloure el treball, i és obligada la referència a les persones i institucions que n'han permès la materialització.

Aquesta memòria és el resultat de la col·laboració i treball intens de diferents persones. En aquest sentit, tots els anys d'investigació han estat ben enriquidors i allò meritori que pugui haver a la meva investigació, ben segur, que és gràcies a terceres persones que han contribuït amb la seva feina en els mostratges, a la tasca de laboratori, o bé amb les seves reflexions estadístiques, teòriques i terminològiques. La referència és, doncs, obligada a: Jaume Mateu, Pau Balaguer, Guillem X. Pons, Miquel Palmer, Emma Navarro, Marta Asensi, Maria Vidal, Mariana Baldo, Joan Miquel Carmona, Gemma Villanueva, Ferran Hierro, Lluís Fiol, Damià Ramis, Pere Bover, Francesc X. Roig, Joan Enric Capellà, Francesc Gràcia, Damià Vicens i Magdalena Ramon.

No és gens senzill definir el mestratge del director de la tesi, Joan J. Fornós, però la influència és òbvia. Sense estructures rígides, però obligant a trobar el bo i millor de cada un, per ell mateix. Feina constant i crítica. La gratitud cap al director de la tesi és infinita ja que per a mi poder haver dedicat vuit anys a la investigació ha estat un autèntic privilegi i la descoberta d'una vocació profunda. La discussió i els comentaris amb els germans Àngel i Joaquim Ginés, així com amb Guillem X. Pons, durant aquests anys, també han estat ben enriquidors i potser caldria parlar de directors de tesi *ad latere*.

La vida acadèmica no és només ciència –per bé i per mal– i, en aquest sentit, tots els anys de treball no haurien estat igual de planers sense la complicitat de Miquel Seguí, Antoni Rodríguez Perea, Bernadí Gelabert, Pere Brunet i els directors del Departament de Ciències de la Terra successius, Lluís Pomar i Joana M. Petrus.

Les estades a diferents centres estrangers són un capital essencial per a la meva recerca. En aquest sentit, des del primer contacte amb el món anglosaxó a la *University of Aberdeen* i les successives visites a la *University of Melbourne,* la meva concepció de la Geografia i de la Ciència ha canviat radicalment. Per tant, vull fer manifest el meu agraïment per les discussions, l'hospitalitat i els bons consells dels Drs. John Loder, Chalmers Clapperton, Eric Bird, Bryan Finlayson, Ian Rutherford, Eric Kirk, Larissa Naylor i, molt especialment, del Dr. Wayne J. Stephenson i la seva família.

No voldria deixar d'esmentar la satisfacció d'haver pogut conèixer biblioteques, de bon de veres, com les de la *Univeristy of Aberdeen*, la de la *University of Melbourne*, o de ben particulars com les de la *Victoria Royal Society*, o la de *Graduate House*, on per cert, hi havia un volum considerable de material de geomorfologia litoral cedit pel Dr. Eric Bird.

També ha estat cabdal per aquesta tesi, la correspondència, les converses i el debat que mantinguérem amb el Dr. Alain Trenhaile de la *University of Windsor* (Canadà) arran de les nostres visites a les costes de Gal·les i a les de Galícia, així com la franca camaraderia i recerca paral·lela dels companys de la *Universidade de Santiago de Compostela*, Drs. Augusto Pérez Alberti i Ramón Blanco Chao.

Finalment, avui puc enllestir aquestes línies gràcies al suport dels meus pares i l'afecte dels meus senyors avis que, amb resignació franciscana, acceptaren la meva dèria adolescent d'iniciar els estudis de Geografia i deixar enrere la trajectòria de la carrera d'enginyeria o els negocis de la família. A la vegada, tots aquests anys han estat còmplices de les meves iniciatives i m'han exonerat d'algunes de les meves obligacions. La referència de gratitud també és obligada a la meva companya, na Maria, que ha fet gala d'una paciència infinita, de més a més de patir les

inclemències de la feina de camp. La redacció de la tesi ha fet que m'adonàs de la meva profunda ignorància lingüística que, sense l'ajut de na Maria, no crec que hagués pogut resoldre.

Protocol obliga, i sense la beca FPI de la Conselleria d'Economia, Innovació i Energia del Govern de les Illes Balears la realització de la tesi no hauria estat possible. També durant aquest període hem gaudit del finançament associat als projectes de recerca: **PB98-0132**: *El karst y la morfogénesis litoral en las Islas Baleares y la costa valenciana: su relación con las oscilaciones del nivel marino a lo largo del Cuaternario*, **MAS3-CT98_0173**: *ESPED, European Shore Platform Erosion Dynamics* i **BTE2002-04552-C03-02**: *El modelado Karstico y la evolución morfológica y sedimentaria del litoral en las Baleares, Valencia y Cerdeña como resultado de las oscilaciones del nivel marino*.

Continguts

1 Les costes rocoses: marc teòric i estat de la qüestió

1.1 Problemàtica en la definició de la costa 1
1.2 La costa rocosa com a objecte d'estudi 2
1.3 Consideracions terminològiques 3
1.4 Agents i processos en el modelat de les costes rocoses 7
1.4.1 Els processos hidràulics 10
1.4.2 L'acció mecànica 11
1.4.3 Els processos físics i químics 11
1.4.4 L'acció biològica 12
1.4.5 Processos subaeris 13
1.5 El paper del rocam i el vector evolutiu 13
1.6 Processos marins *vs.* subaeris 13
1.7 Objectius de l'estudi i aproximació metodològica 14

2 Dinàmica erosiva de les costes rocoses

2.1 Introducció 17
2.2 Tècniques instrumentals per al càlcul de taxes d'erosió a les costes rocoses 17
2.2.1 Els micròmetres d'erosió (MEM i TMEM) 19
2.2.2 L'escàner làser (LS) 21
2.2.3 El tests d'exposició (WLRT) 22
2.3 Patrons i taxes d'erosió a costes rocoses calculades mitjançant TMEM: s'Alavern 22
2.3.1 Àrea d'estudi 22
2.3.2 Materials i disseny experimental 24
2.3.3 Taxes d'erosió anuals a la costa de s'Alavern 25
2.3.4 Variacions horàries de microtopografia a s'Alavern 29
2.4 Patrons i taxes d'erosió a costes rocoses calculades mitjançant TMEM: Marengo 37
2.4.1 Àrea d'estudi 37
2.4.2 Materials i disseny experimental 38
2.4.3 Taxes d'erosió anuals a la costa de Marengo 39
2.4.4 Variacions horàries de microtopografia a Marengo 42
2.5 Patrons i taxes d'erosió a la costa rocosa calculades mitjançant escàner làser (LS) 48
2.5.1 Localitats d'estudi 49
2.5.2 Materials i disseny experimental 51
2.5.3 Resultats i discussió 52
2.6 Patrons i taxes d'erosió a la costa rocosa calculades mitjançant tests d'exposició (*weight-loss rock tablets*) 54
2.6.1 Àrea d'estudi 55
2.6.2 Materials i disseny experimental 55
2.6.3 Resultats 55
2.6.4 Discussió 56
2.7 Patrons i taxes d'erosió a la costa rocosa calculades a partir de la degradació del patrimoni històric: la Torre d'en Beu (Santanyí) 57
2.7.1 Notes històriques i àrea d'estudi 58
2.7.2 Disseny experimental 59
2.7.3 Substrat i formes de meteorització 59
2.7.4 Resultats 59
2.7.5 Discussió 62
2.8 Naturalesa i significat de les taxes d'erosió 63

3 La contribució biològica en l'erosió de la costa rocosa

3.1 Introducció 67
3.2 La zonació de les costes rocoses 67
3.3 L'acció bioerosiva a les costes rocoses carbonatades 70
3.3.1 Acció erosiva dels microorganismes epilítics i endolítics 70
3.3.2 Acció erosiva dels macroorganismes perforadors 72
3.3.3 Acció erosiva dels macroorganismes brostejadors 72
3.4 Patrons i taxes de bioerosió a les costes rocoses de Mallorca 73
3.4.1 Materials i mètode 73
3.4.2 Els macroorganismes bioerosius de les costes rocoses carbonatades de Mallorca 75
3.4.3 La zonació biològica de les costes rocoses de Mallorca 78
3.4.4 Densitats i biometries de les poblacions d'organismes bioerosius de les costes rocoses de Mallorca 80
3.4.5 Factors que determinen la variabilitat de les densitats dels organismes en la zonació de la costa rocosa de Mallorca 85
3.4.6 Taxes i capacitat bierosiva: resultats i discussió 91

4 Freqüència, magnitud i escala en la morfodinàmica de les costes rocoses: s'Alavern com a excusa

4.1 Introducció 95
4.2 Taxes de denudació 95
4.3 Taxes de bioerosió 96
4.4 Tests d'exposició de peces de roca 97
4.5 Taxes de desintegració granular de la façana dels penya-segats 97
4.6 Taxes relacionades amb l'acció mecànica de les onades 98
4.7 Moviments de masses 99
4.8 Discussió 99

5 Formes de meteorització i erosió a les costes rocoses carbonatades

5.1 Introducció 103
5.2 Àrea d'estudi 104
5.3 Materials i mètode 105
5.4 Formes i criteris de classificació 106
5.4.1 Formes de planta arrodonida 106
5.4.2 Formes lineals controlades per fractures 111
5.4.3 Formes lineals controlades per hidrodinamisme 112
5.4.4 Formes poligenètiques 113
5.5 Distribució i organització del *karren litoral* a Mallorca i al Migjorn de Menorca 115
5.5.1 Cala d'en Guixar (CG) 115
5.5.2 Cala Blava (CB) 119
5.5.3 S'Alavern (SA) 120
5.5.4 Cap Salines (CSA) 121
5.5.5 Punta des Sivinar (PS) 122
5.5.6 Cala Murada (CM) 122
5.5.7 Punta de n'Amer (PA) 124
5.5.8 Punta des Faralló (PF) 126
5.5.9 Son Bauló (SB) 126
5.5.10 Punta de Tacàritx (PT) 127
5.5.11 Far de Ciutadella (FC) 128
5.5.12 Cap d'Artrutx (CA) 130
5.5.13 Cala Turqueta (CT) 131
5.5.14 Cap d'en Font (CF) 131
5.5.15 Binibèquer (BN) 132
5.5.16 Cala Sant Esteve (CSE) 132
5.6 L'organització de les formes 133
5.7 Observacions mitjançant microscopi electrònic de rastreig (SEM) 137

5.7.1 Materials i mètode 137
5.7.2 Resultats 138
5.7.3 Discussió 142
5.8 Controls en el desenvolupament de *karren litoral* 145
5.8.1 Controls a macroescala 145
5.8.2 Controls a mesoescala 146
5.8.3 Controls a microescala 147
5.9 Processos, zonació i evolució del *karren litoral* 147

6 Conclusions

6.1 Dinàmica erosiva de les costes rocoses 153
6.2 La contribució biològica en l'erosió de la costa rocosa 156
6.3 Freqüència, magnitud i escala en la morfodinàmica de les costes rocoses 157
6.4 Formes de meteorització i erosió a les costes rocoses carbonatades 158
6.5 Conclusions generals 160

Bibliografia 161

Annexos 177

1 Les costes rocoses: marc teòric i estat de la qüestió

De tots els medis terrestres, la costa és un dels àmbits més atractius perquè constitueix el límit entre el domini pròpiament terrestre i l'estrictament marí, la frontera per antonomàsia. El fet que es tracti d'un medi de transició aboca a una complexitat que es tradueix en un elevat grau de dinamisme: les grans quantitats d'energia que arriben al sistema estableixen un ritme d'activitat, uns canvis en el medi, que difícilment poden ser comparables a d'altres àrees naturals de característiques semblants (Woodroffe, 2003). Les costes des d'una perspectiva socioeconòmica –també cultural– són un espai d'interès elevat. Prop d'un 80% de la població del globus viu no més enllà de 100 km de la costa (Carter, 1988), i és en aquestes zones on hi ha les concentracions urbanes amb major densitat de població. No cal dir, a casa nostra, gaire cosa sobre la importància dels conflictes i de la degradació de la costa, relacionada amb el seu important paper de recurs natural per a l'activitat turística.

1.1 Problemàtica en la definició de la costa

La costa o el litoral, més enllà de l'àmbit de confluència marítimoterrestre (Komar, 1998), és el prisma d'interacció entre l'atmosfera, la hidrosfera, la litosfera i la biosfera (Pardo i Rosselló, 2001). Una zona d'interferència amb certa complexitat espacial i dimensional, atès que la costa no té un caràcter estrictament lineal, sinó que és una franja de terreny més o menys ampla, d'extensió variable i límits imprecisos en cada un dels vectors geogràfics, en el temporal i, també, en el temàtic (Sanjaume, 1985). La determinació sobre l'espai del concepte costa ve condicionat pel criteri amb què s'abordi el seu estudi o la gestió que se'n vulgui fer. Així, sovint es troben biaixos entre allò que la biologia, l'enginyeria, la física, la geologia o l'antropologia, entre d'altres, entenen per costa (Kay i Alder, 1999). En qualsevol cas, cal posar èmfasi en la dificultat d'establir uns límits fixos a la costa, a la interacció dels medis marins i terrestres. El contacte és gradual, equivalent o, de fet, es presenta com un exemple d'allò que l'ecologia defineix com a ecotò; al cap i a la fi, un gradient (Carter, 1988).

La geomorfologia litoral centra el seu interès en l'explicació de la formació i evolució del relleu costaner mitjançant l'estudi de les formes, els sediments i els processos que es donen a la línia de costa actual (Woodroffe, 2003). Aquesta abraça des dels ambients marins poc profunds, influïts pels factors terrestres, fins a terra endins allà on la influència de la mar es fa palesa a l'actualitat o a una escala temporal més ampla. Tanmateix la costa és un epígraf massa ampli i cal acotar-ne el camp d'estudi. Són moltes les classificacions que s'apliquen als ambients costaners des de perspectives diverses; unes posen l'èmfasi en aspectes estructurals, altres en trets oceanogràfics, morfogenètics o, fins i tot, en l'escala de treball. No debades, l'ambigüitat és palesa i el resultat és una gran quantitat de classificacions i confusió terminològica (Fairbridge, 2004; Finkl, 2004; Gràcia *et al.,* 2001).

Existeix un acord general pel qual la geomorfologia litoral se separa en dos camps, a tot estirar, tres camps de treball que s'ocupen: (a) de la configuració i dinàmica associada a les costes arenoses, (b) dels processos i formes dels penya-segats i (c) de l'evolució temporal, en especial durant el Quaternari, d'ambdós medis. Aquestes divisions tenen el seu origen en la interpretació, des de la perspectiva de la teoria de sistemes, de la cèl·lula litoral i el seu corresponent balanç sedimentari (Stephenson i Brander, 2003). Les principals fonts de sediment del sistema litoral (Fig. 1.1) són la descàrrega del material transportat pels cursos fluvials, l'aportació de l'erosió dels penya-segats i, en un altre ordre, la contribució del material transportat per l'onatge tant per la deriva litoral com pel transport ortogonal a la costa, o bé l'aportació del material detrític o biodetrític marí.

Així doncs, en funció del balanç sedimentari, segons hi predomini l'erosió o l'acumulació de sediment, hom distingeix entre costes d'erosió i costes d'acreció (Davies, 1985; Komar, 1998; Woodroffe, 2003). Dins la categoria de costes d'erosió s'identifiquen les costes amb presència de penya-segats i plataformes litorals actives, mentre que les platges, dunes litorals, albuferes i deltes o estuaris constituirien els exemples clàssics de costes d'acreció. Les múltiples combinacions entre un tipus d'ambient i un altre dificulten encara més la separació entre ambdues categories (Finkl, 2004).

No és gens senzill considerar les costes rocoses com a sistemes on sols hi predomina l'erosió. De fet són nombrosos els exemples on els moviments de masses generen grans volums de materials que, en forma d'esbaldregalls, queden estabilitzats enfront dels penya-segats (Balaguer *et al.,* 2002; Bird, 1993a; Lahousse i Pierre, 2003a; Nott, 1990). De la mateixa manera, en un context generalitzat d'ascens del nivell

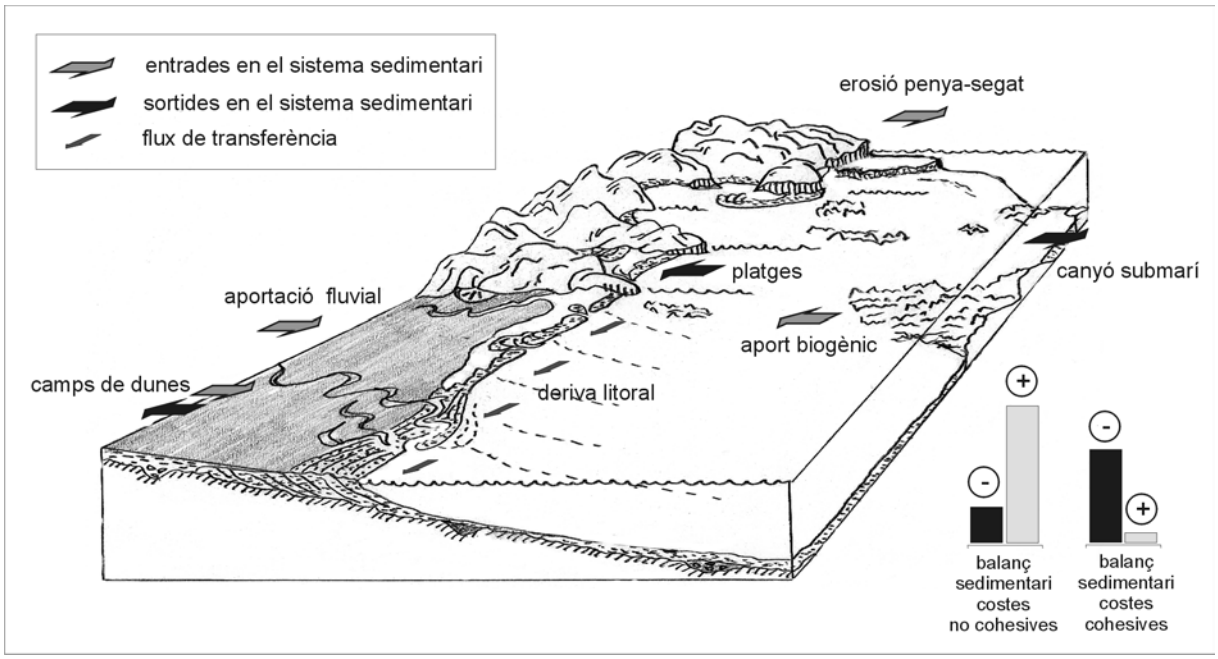


Fig. 1.1 El sistema de cèl·lula litoral en relació al balanç sedimentari i la classificació de les costes.

marí (Long, 2000; 2001), es poden entendre les platges o els deltes com a sistemes estrictament progradants, sense que existeixi una tendència lleugerament negativa en el seu balanç sedimentari?

La resposta no és senzilla, ni depèn d'una sola perspectiva. Per aquest motiu, hi ha qui prefereix separar els principals tipus de costes d'acord amb la naturalesa dels materials que les componen. Així, bàsicament es distingeix entre costes cohesives i no cohesives. Les platges, els deltes o els maresmes s'inclourien dins el grup de les costes no cohesives atès que els materials que les constitueixen no estan litificats i segons les condicions hidrodinàmiques que els afectin poden ser mobilitzats de forma individual. En canvi, les costes cohesives, per oposició, serien aquelles en què el material que les forma es caracteritza per la unió o atracció dels elements constitutius. En aquesta línia, Sunamura (1992) defineix les costes rocoses com la zona de confluència marítimoterrestre composta per materials consolidats amb independència de la seva duresa.

1.2
La costa rocosa com a objecte d'estudi

Les costes rocoses, en les condicions actuals del nivell marí, constitueixen un 80% del perímetre del contacte entre mar i terra (Emery i Khun, 1982); ara bé, bona part de l'èmfasi de la recerca contemporània se centra en platges, maresmes i altres tipus d'ambients amb processos que actuen a unes escales temporals més breus i que són potencialment més vulnerables a un ascens del nivell marí (Trenhaile, 2002).

Pel que fa a la consideració de la costa rocosa com a objecte d'estudi, des d'una perspectiva històrica, podem distingir tres etapes, amb transicions d'una a l'altra més o menys clares, tot deixant de banda els tòpics de les intuïcions d'uns quants savis clàssics o renaixentistes com Herodot o Leonardo da Vinci.

La primera etapa correspondria als fonaments anteriors al segle XX, que bàsicament consideraria les observacions dels naturalistes i les expedicions que hi dugueren a terme. És obligada la referència a Charles Darwin (1846) i l'expedició a bord del *Beagle* arran de les detallades descripcions dels penya-segats de l'illa oceànica de Santa Helena i el paper que assigna a l'onatge en la seva evolució. James Dana (1849), membre de la *United States Exploring Expedition*, descriví i plantejà el problema de l'erosió de l'onatge *vs*. la meteorització com agents dominants en el modelat dels penya-segats i plataformes litorals de Nova Zelanda, Nova Gal·les del Sud i Victòria. Són els anys de consolidació de l'uniformitarisme d'Hutton i de la gestació de l'escola fisiogràfica de Lyell, que emfatitzen la interconnexió entre processos causals i formes resultants (Woodroffe, 2003).

La segona etapa abraça la primera meitat del segle XX i encabeix aquelles recerques que deixen de banda l'àmplia temàtica de la Història Natural per centrar-se en aspectes purament fisiogràfics. És un període amb contribucions bàsicament descriptives que intenten ubicar les formes del relleu litoral en el cicle geogràfic de Davis (1899) o en les alternatives o modificacions que en resultarien. Els treballs arran dels penya-segats tallats a les calcàries cretenques (*chalky*) del Canal de la Mànega i la seva posició

entre els estadis de joventut i senilitat del francès de Martonne (1906 i 1909) o de Johnson (1919), en són un bon exemple. En aquest període, també cal fer esment de les primeres observacions sistematitzades sobre les fluctuacions del nivell marí durant el Quaternari (Daly, 1925; Sayles, 1931), així com la identificació d'antigues línies a costes rocoses (King, 1930) que es convertiren en una component predominant de la geomorfologia litoral.

La tercera etapa, que abraçaria de la segona meitat del segle XX cap endavant, suposa un canvi quant a les tècniques, les teories i el volum de producció científica, tant per allò que afecta els estudis de caràcter dinàmic com els de temàtica evolutiva. L'estudi de l'estratigrafia del nivell marí quaternari passà d'una primària correlació altimètrica a litorals estables i sense deformar, a l'aproximació faunística que en refinaria les interpretacions i el significat geomòrfic (Butzer, 1985). El gir substancial vendria a finals de la dècada dels seixanta, de la mà de la revolució cronomètrica, amb l'aplicació del còmput de les sèries d'urani a l'estratigrafia costera. Una de les primeres aplicacions de la datació amb Th/U es desenvolupà amb mostres procedents de Mallorca (Stearns i Thurber, 1965).

Finalment, l'estudi evolutiu de les costes rocoses es capgirà completament a partir de les anàlisis dels isòtops d'oxigen i de la informació climàtica i del nivell marí que se'n deriva (Shackleton, 1987). Val a dir que, tot i que bona part dels estudis evolutius del nivell marí es duen a terme a costes rocoses, pocs d'aquests estudis posen èmfasi en el paper que aquestes fluctuacions tenen en el modelat dels penya-segats i plataformes. En són una excepció els treballs de Blanco *et al.* (2003), Trenhaile *et al.* (1999), Yébenes *et al.* (2002) i Rosselló i Fumanal (1999). Pel que fa a la perspectiva dinàmica, d'ençà de la dècada dels setanta, comptam amb una sèrie de treballs que malden per quantificar la contribució de diferents agents i processos d'erosió –paper de l'onatge, acció de les sals, bioerosió, etc.– a les costes rocoses, això sí, amb un especial interès per les costes carbonatades (Mottershead, 1989; Robinson, 1977a; Schneider, 1976; Spencer, 1985; Stephenson i Kirk, 1998; Trudgill, 1976a i 1987). Aquestes investigacions suposen el pas de la quantificació, mitjançant tècniques analògiques a les digitals o la tecnologia làser (Gómez-Pujol *et al.,* 2002b), així com el desenvolupament de models matemàtics (Cinque *et al.,* 1995; Trenhaile, 2000 i 2001b), o experiments de laboratori a propòsit dels agents de meteorització/erosió mecànica (Sunamura, 1982), química (Trenhaile, 2001a) i biològica (McLean, 1967).

El viratge d'un enfocament purament descriptiu a una quantificació instrumental dels processos que operen a les costes rocoses, també es pot apreciar en els capítols dedicats a aquest tipus de costa en una seqüència de manuals clàssics de geomorfologia litoral que arrenca amb Guilcher (1958) i Zenkovich (1967) i acaba amb Woodroffe (2003) i Davis i Fitgerald (2003), tot passant per Davies (1972), King (1972), Tricart (1977), Pethick (1984), Carter (1988), Carter i Woodroffe (1994), Trenhaile (1997) i Komar (1998). En aquest període es publiquen dos dels manuals únicament i exclusivament dedicats a la geomorfologia de les costes rocoses. Ambdós manuals han estat redactats des d'una perspectiva dinàmica. Bona part del seu contingut se centra en els agents i processos que intervenen en el modelat del roquissar litoral i s'atorga un èmfasi menor a l'evolució quaternària de les costes rocoses. Els manuals en qüestió són el del gal·lès establert a la universitat canadenca de Windsor, Alan Trenhaile (1987), i el del professor de la universitat japonesa de Tsukuba, Tsuguo Sunamura (1992).

En el nostre marc geogràfic, principalment a Mallorca i Menorca, el coneixement científic de les costes rocoses és considerable i dilatat en el temps (Balaguer, 2002). Deixant de banda alguns precedents com els treballs de les comissions hidrogràfiques (Gómez, 1894), les memòries dels viatgers il·lustrats o naturalistes que ofereixen descripcions de passada (Grasset de Saint-Saveur, 1897; Vargas, 1787; Weyler, 1854), o d'altres que ofereixin descripcions prou detallades de la línia de costa (Hausburg-Lorena, 1884-91), l'inici del treballs pròpiament de geomorfologia litoral de costes rocoses arrenquen amb les observacions a propòsit de les cales mallorquines del geòleg alemany Albrecht Penck (1894) en el seu tractat de geomorfologia. El conjunt de l'obra del geòleg francès Paul Fallot té certa transcendència per a la geomorfologia litoral, en especial els comentaris en què relaciona alguns trets de la costa amb les unitats morfoestructurals de les illes de Mallorca i Menorca (Fallot, 1923). Els treballs de Carandell (1927), on compara les costes del Migjorn i el Llevant mallorquí i les assigna a diferents estadis del cicle geogràfic, apuntant cap a conceptes de "protoneotectònica" i establint paral·lelismes amb la costa nord (si s'entenen les seves afirmacions en el context del seu temps), suposen el punt de partida de la geomorfologia litoral a casa nostra. Les notes de Denizot (1930), d'Hernández-Pacheco (1932) i Mengel (1934), amb qui es tanca la primera etapa de la coneixença de la geomorfologia de les costes rocoses, suposen els antecedents de l'escola quaternarista que dominaria la producció de geomorfologia litoral de la segona meitat del segle XX.

Aquesta escola té dos noms propis, la influència dels quals encara avui és abassegadora. Es tracta del naturalista Joan Cuerda i Barceló i del professor de la Universitat de Texas, Karl. W. Butzer. El seu treball de caràcter evolutiu, desenvolupat a les costes rocoses

de Mallorca, que arrenca de les observacions de Muntaner (1957), esdevé un referent internacional fins a la consolidació dels estadis isotòpics de Shackelton i Opdyke (1973). Bona part dels treballs de Cuerda, on s'hi aborda l'estratigrafia del nivell marí quaternari a partir de l'estudi de la composició faunística de les platges penjades als penya-segats, principalment de Mallorca, es troben a la seva obra de síntesi *Los Tiempos Cuaternarios en Baleares* (Cuerda, 1975 i 1989). És especialment significatiu el treball en conjunt sobre l'estratigrafia plistocena del Migjorn de Mallorca (Butzer i Cuerda, 1962), així com la síntesi dels cicles sedimentaris litorals plistocens de Butzer (1975). També cal fer esment, dins la línia quaternarista, dels treballs de Solé Sabarís (1962). Dins aquesta segona etapa del coneixement científic de les costes rocoses, un grapat de treballs s'escapen de la temàtica quaternarista. Es tracta dels estudis del microrelleu calcari de Walter-Levy *et al.* (1958) o del treball descriptiu, encara que de referència avui per avui, de la costa de Mallorca de Butzer (1962), que anys després reprendria Rosselló (1975).

El tercer període de la coneixença científica de les costes rocoses l'obrí l'obra del professor mallorquí establert a València, Vicenç M. Rosselló Verger (1962). A la seva tesi, on hi estudia tant els aspectes físics com els humans del Migjorn i Xaloc de Mallorca, dedica un interès especial a les costes rocoses i, en concret, al fet geomòrfic de les cales. Si un tret caracteritza aquest període és el de l'increment de treballs i d'autors arran de la plataforma que suposa tant la Universitat de València, com la de les Illes Balears. No debades, de la filiació dels autors dels articles que s'esmentaran, en destaca la importància de les entitats ludicocientífiques i culturals com a plataformes alternatives a la Universitat. En concret, cal fer referència obligada a la Societat d'Història Natural de les Balears o a la Federació Balear d'Espeleologia. El binomi Quaternari-costes rocoses manté el pes relatiu que caracteritzava l'època anterior. Segueixen apareixent nous jaciments, així com també se'n revisen els antics (Vicens i Gràcia, 1988; Vicens i Gràcia, 1998; Vicens *et al.* 2001; Zazo *et al.* 2003). Significatius són els estudis del nivell marí a partir dels espeleotemes freàtics de coves litorals (Ginés, 2000; Pomar *et al*., 1975; Tuccimei *et al.* 1998 i 2000) que han permès d'una banda la construcció d'una corba eustàtica força detallada per a la Mediterrània occidental dels darrers 300 ka (Vesica *et al.* 2000; Tuccimei *et al*., 2006), així com la relació d'aquesta amb el macromodelat i la neotectònica que afecta la costa rocosa del Migjorn i Llevant de Mallorca (Fornós *et al.* 2002). La temàtica del macromodelat litoral a costes carbonatades s'ha relacionat amb aspectes eustàtics, càrstics i fluvials (Rosselló, 1995; Rosselló, 1998) i ha depassat les costes mallorquines per trobar moltes respostes, a la problemàtica que aquests impliquen, a terres menorquines (Fornós *et al.* 1998; Fornós, 2003; Gelabert *et al.* 2005; Rosselló *et al.* 1997; Rosselló *et al.* 2002; Rosselló, 2003). L'estudi descriptiu de les formes de la costa rocosa, tant a ordre mètric com a escales menors, compta amb nombroses aportacions des de finals de la dècada dels noranta. Cal apuntar aquí les investigacions dels espeleobucejadors i quaternaristes vinculats a la Federació Balear d'Espeleologia i la Societat d'Història Natural de les Balears (Gràcia i Vicens, 1998; Gràcia *et al.,* 2001) així com els estudis detallats del *karren* litoral a Mallorca i a Menorca (Gómez-Pujol i Fornós, 2001; Gómez-Pujol i Fornós, 2004a i 2004b). D'ençà del 1998 i en el marc d'un projecte d'investigació a la Universitat de les Illes Balears, s'aborda l'estudi –des d'una perspectiva multidisciplinar– de la dinàmica erosiva de les costes rocoses (Fornós i Gómez-Pujol, 2002). Entre d'altres resultats, s'han identificat els diferents agents i processos implicats en l'erosió dels penya-segats i les seves taxes d'erosió ja en forma de bioerosió (Villanueva *et al.*, 2000; Gómez-Pujol *et al.,* 2002a; Palmer *et al.,* 2003), en moviments de masses als penya-segats (Balaguer *et al.* 2002) o erosió contínua per desintegració granular (Balaguer i Fornós, 2003), o les taxes corresponents a la meteorització química (Gómez-Pujol i Fornós, 2004c). Des d'un punt de vista aplicat, s'han extrapolat aquests resultats a la meteorització i erosió del patrimoni històric arquitectònic a ambients litorals (Gómez-Pujol *et al*., 2002c), així com també s'ha assajat lligar les perspectives dinàmiques i evolutives, comparant la preponderància dels processos terrestres i marins en l'evolució dels penya-segats del Llevant mallorquí (Fornós *et al.*, 2005).

1.3 Consideracions terminològiques

Com a conseqüència del ritme accelerat amb què s'ha intensificat, els darrers decennis, el conreu de totes les ciències, amb més freqüència, als científics, se'ls plantegen problemes en relació a la terminologia o la nomenclatura. Des d'un punt de vista, són problemes que deriven de la necessitat d'inventar nous mots per als nous terrenys d'exploració i per a la descripció dels nous fenòmens. Des d'un altre punt de vista, són entrebancs derivats d'una comunitat científica cada vegada més gran i de la presència dominant i abassegadora de la llengua anglesa, pel que fa a les relacions i publicacions, en detriment de les altres llengües. Aquesta no és una realitat aliena a la geomorfologia, i encara menys a la geomorfologia litoral (Pardo i Rosselló, 2001; Pedraza, 1996; Rosselló, 2004). Sovint es dóna el cas que un equip de treball o una escola ha batejat amb un terme un fet específic, mentre que un altre l'ha batejat amb un altre nom; casos de duplicitat i, fins i tot, de multiplicitat terminològica hi són freqüents. El resultat és que els

diferents membres d'una mateixa comunitat lingüística han de recórrer a l'anglès per definir de forma precisa determinats conceptes. Val a dir que els darrers anys són rics en contribucions que malden per corregir aquesta tendència. Això és especialment cert per a la llengua catalana, ja que en l'àmbit de les Ciències de la Terra comptam amb el *Diccionari de Geologia* de l'Institut d'Estudis Catalans – Gran Enciclopèdia Catalana (Riba, 1997), amb les aportacions del *Diccionari de Geografia Física* del TERMCAT (Panareda i Rosselló, 2003) o amb el primer *Manual de Geografia Física* publicat en català (Rosselló *et al.,* 1998). Malauradament, la minsa tradició en l'estudi de les costes rocoses en comparació amb altres matèries, bé des d'una perspectiva fisiogràfica –descriptiva– com dinàmica, ens situa en un escenari, si més no, poc confortable.

Un dels entrebancs terminològics neix de l'ús indistint dels adjectius rocós i rocallós a l'hora d'adjectivar el concepte de costa. Alguns autors prefereixen el terme rocallós en lloc del de rocós per defugir de les semblances amb el terme castellà de *costa rocosa.* Però el binomi que ens ocupa és una constant també a les llengües consolidades com de referència a la ciència: *rock coast vs. rocky coast* a l'anglès i *côte rocheuse vs. côte rocailleuse* en el cas del francès. Un espigoleig dels diccionaris de referència de la llengua castellana aviat ens ofereix el terme de *rocalloso*, per bé que aquest no ha tengut fortuna en la bibliografia geomorfològica de litoral. L'etimologia dels termes rocós i rocallós es troba en el mot preromà *rôcca,* fet que explica la seva presència en bona part de les llengües romàniques i també germàniques. El seu homònim en llatí pot prendre tres formes: *saxum*, *rupes* (emprat especialment per als murs de pedra), o *scopulus* del qual es deriva el terme escull. L'adjectiu rocós deriva del substantiu roca; a la vegada, rocallós ho fa de rocall, que en el seu torn, té l'arrel en el terme roc (Coromines, 1986; DIEC, 1998). Per roca cal entendre una massa considerable de matèria mineral, en geologia, qualsevol matèria mineral que forma part de l'escorça terrestre. El mot roc designa un fragment o tros de pedra, mentre que el de rocall defineix el conjunt de rocs o fragments despresos de la roca. Així doncs, sota el terme de costa rocosa s'hi encabirien aquells sectors de la costa formats per un cos sòlid i homogeni de roca. L'exemple paradigmàtic el constituirien aquells penya-segats de perfil recte que cauen a plom mar endins. En canvi, el terme costa rocallosa faria referència a aquells segments de la costa formats per acumulacions de fragments de pedra. Un exemple prou evident en seria un codolar. Ara bé, d'un extrem a un altre, hi ha infinites combinacions, codolars rere els quals s'hi aixeca un penya-segat, penya-segats amb cons d'esbaldregalls o flanquejats per dipòsits de moviments de masses, etc. La solució que es proposa és la d'emprar el terme costa rocosa com a genèric, atès que allò que la defineix en essència és la presència d'un cos de materials cohesius. En canvi, l'adjectiu rocallós té un sentit més d'inestabilitat que, tot i que és la situació dominant de moltes costes rocoses, no és un concepte, segons el nostre parer, prou general, perquè rere la rocalla sempre hi queda la façana de pedra.

En la parcel·la de la toponímia i la parla popular, no hi trobam cap genèric que reculli el conjunt de formes del relleu tallat sobre materials consolidats (Taula 1.1). Termes com espadat, precipici, penya-segat o tall serrat, no tenen cap tradició popular i, com passa amb el terme costa rocosa, són un artefacte acadèmic. No obstant això, és ben viva a la tradició marinenca i a la toponímia illenca, la distinció entre penyes (el vector erosiu del sistema sedimentari) i les platges o cales (ambients de balanç sedimentari positiu) (Aguiló, 1981; 1991 i 1996). Altres substantius habituals, com a apel·latius dels topònims, són: balç, espenyador, frontó, bancal, cingle, pedra, tirada, forapeu o cordó (Ordines, 2001 i 2004).

A la figura 1.2 i taula 1.2, s'hi presenta una proposta terminològica per a la descripció de les costes rocoses. També s'hi faciliten els equivalents en llengua castellana, francesa i anglesa. Els criteris considerats per a la tria dels termes segueixen les recomanacions del pròleg del *Diccionari de Geologia* de l'Institut d'Estudis Catalans i de l'Enciclopèdia Catalana (Riba, 1997). De més a més, s'han adoptat aquells termes de la llengua comuna que eren més acurats per a la descripció de les formes, o processos que es donen a les costes rocoses. Per exemple, per a la definició de les depressions d'ordre mètric a centimètric desenvolupades sobre superfícies subhoritzontals, és preferible el terme cocó i no cadolla, bassa o gnamma. El motiu rau en el fet que cadolla és un terme generalista aplicat a cubetes tancades, principalment sobre roques cristal·lines del medi continental. Aquest és l'equivalent del manlleu serbocroat gnamma. En canvi cocó, encara que no és un terme estès arreu del domini de la llengua catalana, és prou específic perquè, llevat de comptades ocasions i especialment a les Illes Balears, s'empra per designar les depressions de fons pla sobre la roca a vorera de mar i sobre substrats carbonatats. Un altre dels criteris emprats per a l'encuny dels termes és evitar tots aquells adjectius que impliquin un fet genètic quan les formes que descriuen poden ser convergents. És a dir, diferents processos operen sobre la roca i la seva importància relativa varia en funció de les condicions del medi. Un exemple prou clar per il·lustrar aquest criteri és el de les plataformes litorals. Entenem per plataformes litorals aquelles superfícies rocoses horitzontals o subhoritzontals localitzades a la línia de costa (Takahashi, 1975). Existeix un gran confusió terminològica arran de les nombroses descripcions i les diferents escoles que s'han ocupat d'aquest fenomen. Termes com plataformes d'abrasió, plataformes intermareals, plataformes rocoses o de meteorització, *trottoirs*

Terme	Definició i observacions	Topònims
Balç	Arcaisme (<llatí balteum, 'cinyell') que vol dir exactament 'tallserrat', 'penya-segat'.	Sa punta des Balç (Santanyí, Ma)
Banc, bancal	Escalonament en un penyalar vertical. Especialment abundant a les marines mallorquines i el Migjorn de Menorca.	Es Bancals (Llucmajor, Ma) Punta des Bancassos (Santanyí, Ma) Banquet des Coloms (Manacor, Ma) Bancal de na Sarda (Artà, Ma) Ses Bancades (Maó, Ma) El Bancalet (Pollença, Ma) Es Bancalets (Alcúdia, Ma)
Cingle	Espadat de roca que forma timba. A la toponímia d'interior s'empra amb un sentit oposat com a relleix o replà situat entre dues timbes superposades.	Racó des Cingle (Sóller, Ma) Cingle des Pi (Escorca, Ma) Cingle des Càrritx (Escorca, Ma) El Cingle Verd (Pollença, Ma) Es Cingle (Sa Dragonera)
Cordó	Penyals verticals que formen un front recte sense accidents topogràfics. Terme amb un abast geogràfic restringit a l'illa de Formentera.	
Espenyador	Paret vertical arran de mar. Terme amb un abast geogràfic restringit a l'illa d'Eivissa. És freqüent la seva variant castellanitzada, *espenyadero*.	
Frontó	Paret vertical amb una continuïtat espacial marcada i sense accidents topogràfics en planta.	Frontó des Molar (Manacor, Ma) Es Frontet (Santanyí, Ma)
Forapeu	Promontori espadat. Terme d'abast geogràfic restringit a l'illa d'Eivissa.	
Marès	Penya-segat on aflora la pedra arenisca emprada per a la construcció. És un terme localitzat bàsicament a Menorca i el NW de Mallorca. Habitualment es tracta de pedreres.	Es Marès (Mercadal, Me) Es Maresos (Alaior, Me) El Maresar (Pollença, Ma) Es Maresos des Coll Baix (Alcúdia, Ma) Es Maresos de Solana (Alcúdia, Ma) Es Maresos (Capdepera, Ma)
Pedra	Parets verticals de roca arran de mar, petit illot litoral amb parets abruptes.	La Pedra Alta (Pollença, Ma) Pedra Dura (Pollença, Ma) Sa Pedra de s'Ase (Banyalbufar, Ma) Pedra des Torrent (Capdepera, Ma) Sa Pedra Alta (Ciutadella, Me) Sa Pedra Blanca (Valldemossa, Ma) Sa Pedra Xapada (Son Servera, Ma)
Penya	Parets verticals on queda descoberta una gran massa de pedra.	Punta de ses Penyes Altes (Manacor, Ma) Es Penyalar (Felanitx, Ma) Penyal Roig (Felanitx, Ma) Ses Penyes Roges (Calvià, Santanyí, Ma) El Penyal Gran (Pollença, Ma) Es Penyal des Llamp (Sóller, Ma) ses Penyes Altes (Artà, Ma) Es Penyalar de sa Monja (Calvià, Ma) Penyes d'Alaior (Alaior, Me) Penyes d'Alparico (Ciutadella, Me) Penyals de Curniola (Ciutadella, Me) Ses Penyes Negres (St. Joan de Labritja, Ei) Es Penyalar (Illa dels Conills, Ca) Pedrafort (Llucmajor)
Roca	Parets verticals de roca arran de mar, petit illot litoral amb parets abruptes.	Sa Roca Alta (Son Servera, Ma) Sa Roca (Manacor, Ma) La Roca Llisa (Pollença, Ma) Roca de sa Sal (Ferreries, Me) Roca de s'Àguila (Alaior, Me)
Tirada	Tram de costa rocosa més o menys recte i continu. Terme d'abast geogràfic mallorquí.	Sa Tirada (Felanitx, Ma)

Taula. 1.1 Termes genèrics relatius a les costes rocoses (Ma: Mallorca, Me: Menorca, Ei: Eivissa, For: Formentera, Ca: Cabrera).

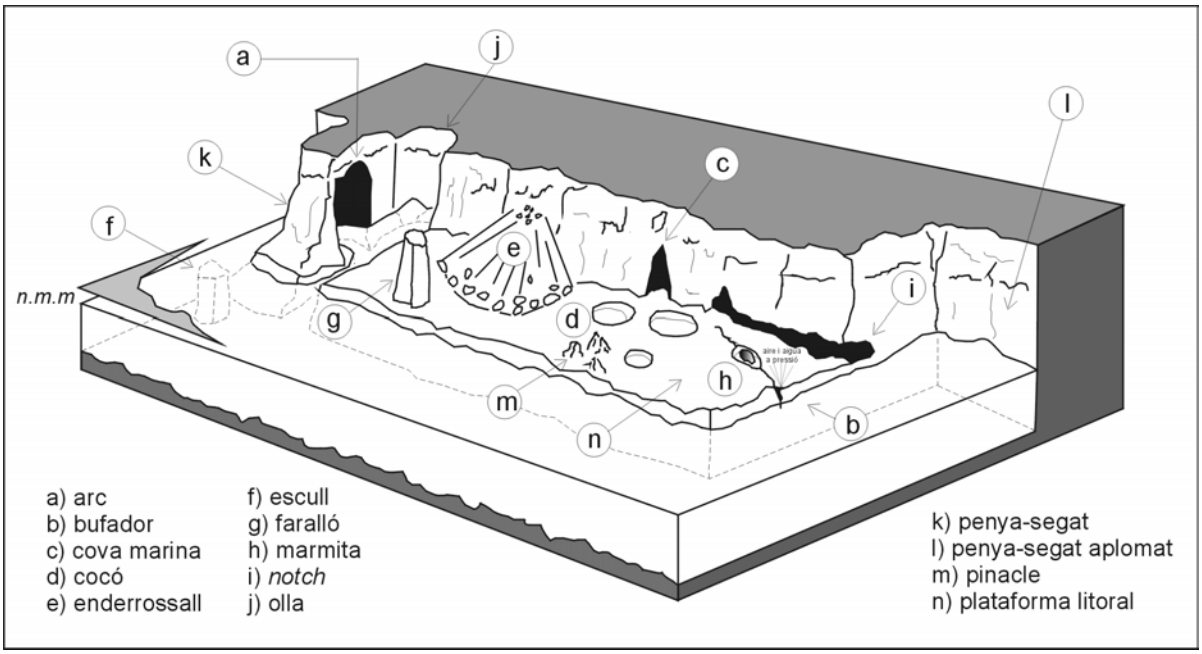


Fig. 1.2 Formes i elements fisiogràfics de les costes rocoses.

rocosos, etc. abunden en la bibliografia. Els estudis de la dinàmica erosiva d'aquests elements de la costa (Griggs i Trenhaile, 1998; Stephenson i Kirk, 2000a i 2000b; Trenhaile, 2002) posen de manifest el paper predominant dels agents de meteorització, biològics i també físics en l'evolució de les plataformes, de manera que no es poden assignar sols a l'acció de l'onatge sobre la roca. Així doncs, cal evitar el terme de plataforma d'abrasió o plataforma d'erosió litoral que proposen Riba (1997) o Panareda i Rosselló (2003), tot i que aquests darrers, al seu *Manual de Geografia Física,* adoptaven el terme més generalista de plataforma litoral o plataforma sotaiguada (Rosselló *et al.,* 1998).

Finalment, s'han adoptat aquells manlleus de llengües estrangeres que tenen un ús consolidat entre els especialistes. Aquest pot ser el cas del mot francès *trottoir* o bé de casos com el de *notch*, que, malgrat tenir alternatives en la llengua comuna –com és el cas de visera, balma, barbacana, barbada– aquestes o bé no són específiques del medi litoral, o bé només designen una part d'aquesta forma. Per exemple, el concepte anglès de *notch* fa referència a la totalitat de la forma, sostre – paret vertical – base horitzontal; en canvi barbacana, balma o barbada, fan referència a la part superior d'aquesta. A més a més, el *notch* és un terme emprat quasi exclusivament per a la geomorfologia litoral.

1.4
Agents i processos en el modelat de les costes rocoses

L'estudi dinàmic de les costes rocoses consisteix a identificar els processos i agents de meteorització i erosió, així com a aclarir-ne la seva contribució en la formació del relleu. Ara bé, la caracterització dels agents de meteorització i l'erosió sobre substrats rocosos topa amb entrebancs de tipus metodològic i instrumental. En primer lloc, existeix certa dificultat per tal de discernir, de forma intel·ligible, entre els elements del binomi meteorització-erosió en els processos geomòrfics que operen en les situacions reals, no teòriques (Goudie i Viles, 1999). Aquesta situació respon al fet que la meteorització consisteix en un gran nombre de mecanismes, sovint interrelacionats i encara poc compresos, que contribueixen a l'alteració de la roca. Molts, per no dir bona part dels processos de meteorització – meteorització per sals, per radiació tèrmica, canvis en la fase de l'aigua, etc.–, i en especial aquells en els quals juga un paper important la biologia, es coneixen en estructura de caixa negra. És a dir, partim de l'estadi inicial i n'intuïm la situació final que se'n deriva; però no sabem ben bé, o de forma instrumental, com s'ha produït l'alteració del substrat (Viles, 2004). S'hi ha d'afegir que molts processos s'han inferit a partir de les formes, i aquestes no són sempre un indicador prou sòlid dels processos i de la seva importància relativa en els ambients litorals (Trenhaile, 1987; Spencer, 1988 i Stephenson, 2000). Així mateix, també juguen el seu paper, en aquesta distorsió, les velocitats a les quals els mecanismes de meteorització actuen i la seva materialització com a retrocés o desmanegament de la costa. En efecte, la meteorització desenvolupa un doble paper en l'evolució del relleu: d'una banda hi ha mecanismes d'alteració l'efectivitat dels quals, en termes de disgregació del rocam, destaca a escales temporals curtes, mentre que d'altres només tenen transcendència en escales temporals i espacials

arc *m*

es arco costero
fr arc côtier
en sea arch

Obertura a una massa de roca o material cohesiu a la costa resultat de l'erosió diferencial com a resposta de la disposició estructural dels materials, la litologia i la fracturació. També poden estar relacionats amb el col·lapse de coves marines o de cavitats càrstiques.

Sin. vulg.: pont

bufador *m*

es bufadero, bufón, sopladero
fr cheminée de jaillissement, souflard
en blowhole

Forat vertical a les roques properes a la mar per on surt aire o els esquitxos d'aigua impulsats per les ones a manera de guèisers.

cova marina *f*

es cueva marina, *furna* (gallec)
fr grotte marine, grotte littoral
en sea cave

Cavitat vora el mar o arran de l'aigua, oberta per l'acció de les onades aprofitant diaclàsis, fractures i diferències litològiques, o bé per un procés càrstic. Generalment són de dimensions modestes.

cala *f*

es cala
fr calanque, crique
en bight, cala

Entrada del mar en una costa rocosa i abrupta en paisatges calcaris, que respon a un accident tectònic, a un esfondrament o a l'envaïment d'un barranc.

cocó *m*

es cubetas, pozas, tinajas
fr vasque, mares
en solution pan, basin pool

Depressió de planta el·líptica, poc profunda i de fons pla, amb dimensions de decimètriques a mètriques, de vores aixecades i sovint en sobreplom excavada a la superfície de la roca a la costa, en la qual es reté l'aigua.

Sin.: gnamma, cadolla, kamenitza

enderrossall *m*

es cono de derrubios, desmoronamiento
fr éboulement, éboulis
en scree, talus scree, debris fall

Acumulació detrítica grollera formada per blocs i rocs caiguts i esllavissats per efecte de la gravetat a un vessant escarpat o un penya-segat, i que s'acumula a la part baixa o al peu d'aquest.

Sin.: esbaldregall, enderroc

escull *m*

es arrecife, escollo
fr écueil, récif
en rock, reef

Roca a flor d'aigua o a molt poca distància de la superfície de l'aigua, sovint originada pel retrocés d'un penya-segat.

Sin. vulg.: altina, baix, barbada, llosa, prim, roca, seca, tenassa

façana de penya-segat *f*

es pared o frontal del acantilado
fr face de falaise, façade de falaise
en cliff face

Pla frontal del penya-segat.

faralló *m*

es aguja marina, farallón, estaca
fr aiguille
en stack

Cos de roca, més o menys aguda, que sobresurt del nivell de la mar, generalment pròxima a la costa. Testimoni de posicions anteriors de la façana del penya-segat o del desmantellament d'un arc.

karren litoral *m*

es lapiaz litoral, carst litoral
fr karst littoral
en coastal karren, phytokarst

Conjunt de formes de meteorització d'ordre centimètric a mètric, que es desenvolupen sobre el rocam carbonatat i en els quals la dissolució juga un paper important. Cocons, pinacles i alvèols de dimensions variades en són els elements més característics.

Sin.: rascler litoral, lapiaz litoral
Sin. vulg.: carnatge, morter, rellar, puat

Nota: és preferible l'ús del terme karren en lloc de carst en el sentit que just es tracta d'una expressió subaèria del fenomen de meteorització (Ginés, 2000). De la mateixa manera termes com rascler o rellar estan estretament lligats a la descripció genèrica d'indrets dominats per formes lineals, com el *rillenkarren* o el *runnenkarren*, mentre que als ambients litorals són dominants les formes de planta circular.

marmita *f*

es marmita de gigante
fr marmite de géant
en pothole

Depressió de planta arrodonida formades en el substrat rocós per l'acció física tant d'arenes, graves, còdols o blocs que són moguts o giravoltats per l'energia de l'aigua i que acostumen a romandre a l'interior.

notch *m*

es balma, muesca, ranura
fr encorbellement, encoche, corniche
en notch, groove, nip

Indentació horitzontal de pocs centímetres a bastants metres, tallada a la costa rocosa en el vessant que dóna a la mar i relacionada amb el n.m.m.

Sin.: balma, visera, cornisa, mòssa
Sin. vulg.: sobalma, barbacana

Nota: es proposa el prèstec del terme anglès arran de la seva consolidació i especificitat per definir el conjunt de la forma a un ambient *litoral*. Balma, visera i els termes derivats sols fan referència a la meitat superior d'aquesta forma, o bé descriuen formes típiques del relleu continental.

olla *f*

es ensenada
fr crique semi-circulaire, hémicycle d'érosion
en coastal collapse doline

Raconada rodonenca i parets verticals a vorera de mar. A la seva gènesi s'hi combinen fenòmens estructurals i de col·lapse de cavitats càrstiques o captura de dolines.

Sin.: esfondrament, estructures de col·lapse, col·lapse

penya-segat *m*

es acantilado, cantil
fr à-pic, falaise, precipice
en bluff, cliff, sea-cliff

Escarpament rocallós o de material cohesiu de pendent bastant fort, tallat en la línia de contacte entre la terra i el mar o sobre una plataforma litoral.

Sin.: tallserrat, espadat

penya-segat aplomat *m*

es acantilado buzante, acantilado a plomo
fr falaise plongeant
en plunging cliff

Penya-segat que descendeix en vertical dins la mar fins a profunditats considerables, sense que es desenvolupin plataformes. Són típics d'una subsidència molt ràpida de la terra, o bé d'un control estructural acusat.

penya-segat compost *m*

es acantilado compuesto
fr falaise composite
en composite sea-cliff, slope over wall

Penya-segat que combina elements i segments de vessant de diferent signe. Pot tenir una aparença esglaonada, confegir vessants còncaus i/o convexos i parets verticals.

pinacle *m*

es aguja, pináculo
fr spitzkarren, pinnacle
en spitzkarren, pinnacle

Cossos de roca piramidal aïllats uns dels altres, d'ordre centimètric i mètric del karren litoral.

plataforma litoral *f*

es plataforma litoral, acera
fr plate-forme littorale, trottoir rocheux
en shore platform

Superfície rocosa horitzontal o subhoritzontal localitzada a la línia de costa arran del nivell de la mar o del nivell lacustre al peu d'un penya-segat.

Nota: és preferible evitar l'adjectivació d'aquesta forma (i.e. plataforma d'abrasió litoral, plataforma d'erosió litoral, plataforma de cadolles), atès que són múltiples i concurrents els processos que llavoren el rocam.

trottoir *m*

es acera, banqueta, trottoir
fr trottoir, trottoir construït, banquette
en trottoir, surf bench, organic crust

Construcció biogènica, produïda principalment per algues calcàries i vermètids, que es disposa a sobre o adossada a la costa rocosa des de pocs cm per sobre el nivell del mar fins a gairebé un metre per sota.

Sin.: tenassa, vorera, androna

zona d'esquits *f*

es zona de salpicadura
fr zone rejaillissement
en splash zone

Segment del perfil de costa on l'aigua de mar arriba habitualment en forma d'esquits.

zona de ruixim *f*

es zona de roción
fr zone de embruns, zone de poudrin
en zone of sea spray, spindfrift domain

Segment del perfil de costa on l'aigua del mar arriba en forma de polsim aixecada pel vent en rompre una onada i que cau com si fos pluja.

Sin.: polvorització, esprai

zona d'onatge *f*

es zona de oleaje, de batida
fr zone de vagues
en swash zone

Segment del perfil de costa on l'aigua de mar arriba després de rompre l'onada.

Taula. 1.2 Proposta terminològica per a la descripció de les costes rocoses amb especial referència al rocam carbonatat.

llargues (de Boer, 1992). Un exemple prou eloqüent són els treballs d'Spencer (1981) a la costa de l'Illa de Grand Cayman. Les calcarenites que estudia es desmantellen per desintegració granular. Els agents de meteorització ataquen el ciment que uneix els grans fins que queden solts. Però, en termes de canvis en la microtopografia, aquests estan relacionats amb esdeveniments climàtics com les tempestes o els forts vents. Per si no n'hi havia prou, s'hi afegeix la complexitat espacial en el sentit de les dificultats que cal considerar quan es pretén relacionar l'escala en la qual s'hi observa un mecanisme de meteorització, o un procés erosiu, i l'escala en la qual aquest opera i com afecta, tot plegat, a la formació de relleu (Viles,

2001). Hom agrupa els processos que actuen a les costes rocoses en cinc grans grups, tot i que a vegades no sigui senzill discernir on acaba l'acció d'un i on comença la de l'altre, o les sinergies que s'hi donen (Griggs i Trenhaile, 1994; Woodroffe, 2003). Els cinc grans grups són: l'acció hidràulica, l'acció mecànica, l'acció fisicoquímica, l'acció biològica i l'acció gravitatòria, a més a més d'altres processos propis dels vessants subaeris.

1.4.1
Els processos hidràulics

Les forces hidràuliques produïdes per l'onatge inclouen la pressió hidrostàtica, relacionada amb la massa d'aigua, i les pressions dinàmiques relacionades amb el moviment de l'aigua.

La pressió hidrostàtica s'exerceix per la columna d'aigua que hi ha sobre una superfície de roca submergida i augmenta així com ho fa la profunditat. Així, a la costa, hi ha superfícies de roca que romanen tot el temps submergides, però d'altres que experimenten la pressió hidrostàtica de forma alterna, de manera que aquest joc de càrrega i descàrrega de la superfície rocosa pot contribuir al seu debilitament (Trenhaile, 1987).

La pressió dinàmica com a agent de la meteorització-erosió de les costes rocoses involucra les forces de tensió i fricció de l'aigua amb la roca i amb el material solt. L'acció d'impacte continuat sobre el penya-segat, amb onatges de tipus estacionari –clapoteig–, es coneix com a martelleig o impacte hidràulic (*water hammer*). Aquest procés també actua en situacions de rompent, tot i que en un segon terme, després del desfonament o l'arrencada hidràulica (*wave quarrying*) que es produeix arran de les forces de compressió, fricció i tensió que exerceix el moviment de l'aigua. Sunamura (1982), mitjançant simulacions de laboratori, posa de manifest que l'acció de l'onatge per ella mateixa és baixa i que la capacitat erosiva augmenta –com a mínim el doble– si implica transport de material. És a dir, facilita els processos d'erosió mecànica. Les dades empíriques de Blackmore i Hewson (1984) apunten cap a la mateixa línia, si bé destaquen que, com més turbulent sigui l'onatge, es redueix la pressió del seu impacte sobre la roca arran de la gran quantitat d'aire capturat dins la massa d'aigua. O bé, també, que la distribució de la pressió mitjana en la vertical de l'ona és, més o menys, constant.

A les accions estrictament hidràuliques, cal afegir-hi les pneumàtiques derivades de la interacció entre aigua i aire, especialment a esquerdes, canals i conductes amb grans efectes sobre les comunitats biològiques (Gaylord, 1999) i/o en el desmantellament de fragments de roca de mida variable, afavorits pel diaclasament i la presència de fractures (Noormets *et al.* 2004; Trenhaile i Layzell, 1981), o els efectes del desfeta de les bombolles d'aire a gran pressió, que es coneix com a cavitació, a la qual se li suposa una acció de desgast de la roca de caràcter físic i també químic (Kaye, 1957).

La figura 1.3 sintetitza les relacions entre el tipus d'ona i l'abast de la seva acció espacial en funció del tipus de penya-segat o plataforma. L'energia de l'ona depèn de la posició on trenca, o de la seva reflexió a la façana del penya-segat. Els penya-segats aplomats o immergits són molt reflectius. Bona part de l'energia associada a l'onatge incident retrocedeix interactuant amb el següent tren d'ones. Aquest fenomen genera una ona estacionària –clapoteig– de nul efecte erosiu (Sunamura, 1992). En aquestes condicions, s'ha suggerit la possibilitat de formació de *notch*, però estretament lligada a la concurrència de l'acció pneumàtica de l'aigua, a l'acció química i a les debilitats del rocam, associades a la fracturació del rocam i a les diferències litològiques (Matsukura, 1988; Sunamura, 1994). Quan la batimetria permet el trencament de l'ona, la pressió dinàmica augmenta respecte a les ones estacionàries i permet la càrrega de sediment a la columna d'aigua. Aquest fet es tradueix en l'acció mecànica sobre la façana del penya-segat. L'operació de les forces hidràuliques sobre les plataformes és força més complexa i presenta diferències de gradació respecte del perfil. Les ones que trenquen al peu de les plataformes subhoritzontals (tipus B) es desplacen plataforma endins en forma de corró –*bore*–, tot perdent energia arran de la turbulència i la fricció amb la superfície de la plataforma i la disminució de l'alçària de l'ona. En el cas de les plataformes inclinades, atès que l'alçària d'ona disminueix constantment, l'ona perd energia. La tipologia de rompent d'onada depèn de la batimetria (Trenhaile, 1997): mentre a les plataformes subhoritzontals hi dominen rompents per capbussament (*plunging*), a les plataformes amb pendent (tipus A) són més freqüents els rompents d'ona per escampament (*spilling*).

Stephenson i Kirk (2000a), a partir de la instal·lació de correntímetres i l'estudi de les boies en mar profunda i al peu de dues plataformes llavorades a calcàries blanes a la península de Kaikoura (Nova Zelanda), posen de manifest que les ones que rompen a les plataformes no juguen un paper transcendent en l'erosió de les plataformes. Bona part de l'energia de les ones es perd en tornar somes i per la refracció. Només entre un 0,3% i un 8,8% de l'energia de l'ona arriba a peu de plataforma. L'energia de l'ona encara disminueix més quan es desplaça sobre la superfície de la plataforma; sols entre un 4,9% i un 6,8% de l'energia que arriba al peu de plataforma es registra al peu del penya-segat. Si les unitats d'energia es transformen en esforç de cisalla, aquesta és menor que la resistència mecànica de la roca. Aquest fet

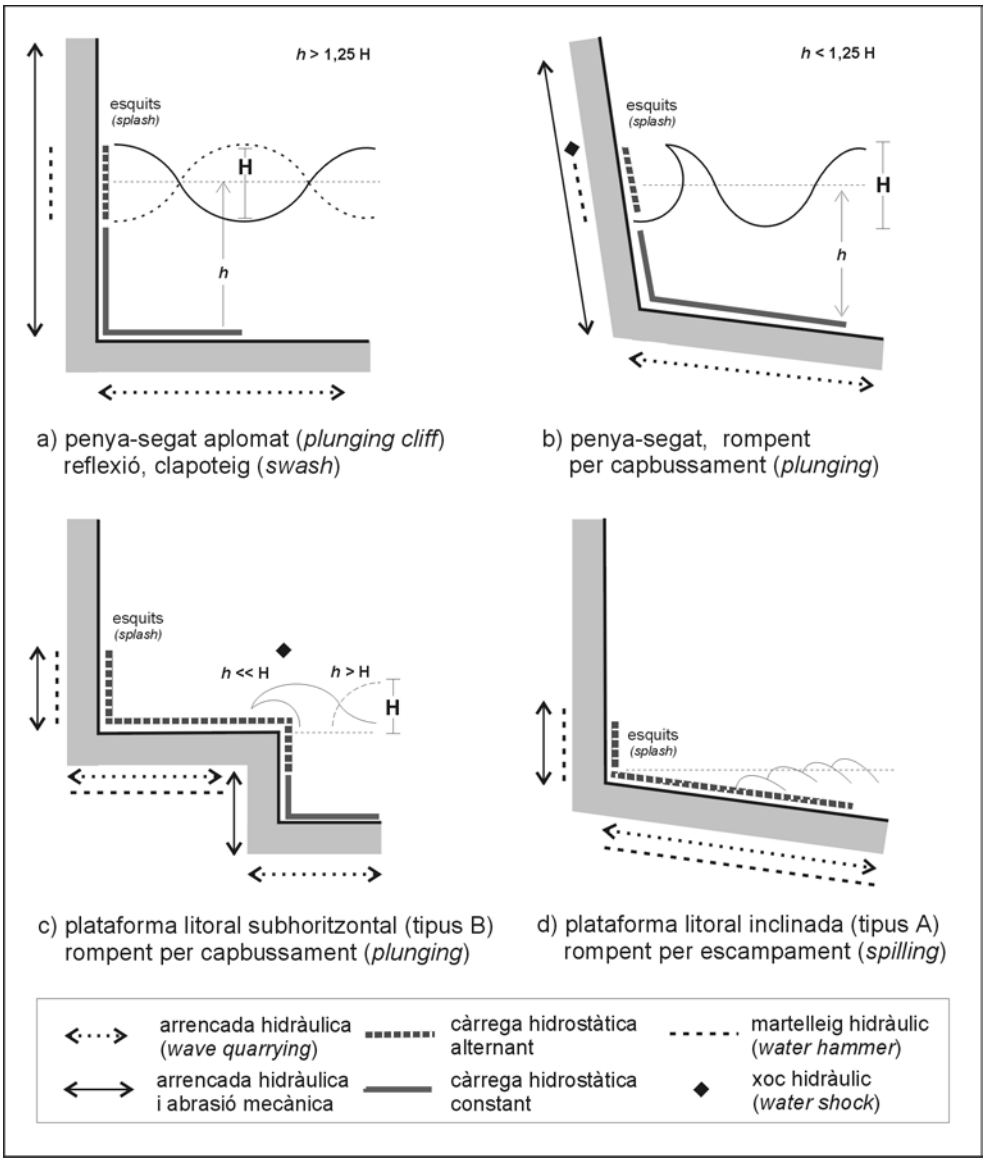


Fig. 1.3 Relació entre el tipus de rompent d'onada i la forma de penya-segats i plataformes (modificat de Trenhaile, 1997).

manifesta l'escassa potència de l'onatge, *per se*, com a agent erosiu.

1.4.2
L'acció mecànica

L'acció mecànica la duu a terme l'onatge quan carrega o desplaça material sedimentari. Aquesta inclou els processos d'abrasió i d'atrició marines. L'abrasió marina és l'erosió de la roca causada pel frec i el xoc pels materials transportats per les ones (Jones i Williams, 1991). Mentre que l'atrició marina és el procés pel qual les partícules de sediment, colpejant la roca i arran de l'impacte, la fragmenten, especialment quan se'n desprenen materials de diferents característiques o propietats mecàniques, com és el cas dels còdols de sílex –*flint*– als penya-segats llavorats en calcàries crentenques –*chalky*– (Williams i Roberts, 1995). La comparació de les taxes d'erosió entre costes rocoses (penya-segats i plataformes litorals), amb presència de materials susceptibles d'actuar com a agents erosius, de metralla (e.g. arenes i graves de platja), posa de manifest la importància de l'acció mecànica. Així, a la costa oriental d'Anglaterra, Robinson (1977b i c) constata que les taxes d'erosió sobre un substrat de turbidites liàssiques és quinze vegades major a les localitats amb disponibilitat de material clàstic, que no allà on no apareixen platges.

En la mateixa línia apunten els resultats de Trudgill (1976a), tot i que amb ordres de magnitud menors, d'1/4 per a les costes rocoses de l'illa oceànica d'Aldabra desenvolupades sobre calcarenites força més dures (Fig. 1.4).

1.4.3
Els processos físics i químics

Els processos físics i químics relacionats amb l'aigua marina queden sota l'epígraf d'acció fisicoquímica. Són molts els processos de meteorització que actuen sobre el rocam a la costa, i no sempre en tenim un coneixement ni complet, ni prou sòlid. De més a més, sovint estan tan interrelacionats que costa destriar-los (Bland i Rolls, 1998).

La meteorització per l'acció de l'aigua a baixes temperatures és un clàssic a latituds on les temperatures fluctuen amb freqüència per sobre i per sota del punt de congelació. L'aigua pot augmentar un 9% el seu volum quan es congela i genera una acció de falca de la roca que pot arribar a donar taxes d'erosió de 0,3 a 2,5 $mm \cdot a^{-1}$ per l'expansió de l'aigua en forma de gel (Hall, 1988).

La meteorització per sals és un dels processos més recurrents a les costes rocoses (Goudie i Viles, 1997) que té el seu origen en el creixement de cristalls de sals, a partir de les solucions que circulen per les esquerdes o saturen la porositat de la roca. Són molts els factors que hi intervenen: des dels canvis en els paràmetres ambientals com la temperatura (Goudie, 1994) o la humitat (Goudie, 2000), tot augmentant les dimensions dels cristalls i la pressió que exerceixen sobre la porositat de la roca. Mottershead (1989) dóna taxes d'erosió relacionades amb l'aportació de sals pel ruixim marí de l'ordre de 0,6 $mm \cdot a^{-1}$.

Un altre procés de meteorització física fa referència a la humectació i dessecació de la superfície de les roques arran dels cicles mareals, curts períodes de pluja o temporals. És especialment significativa sobre minerals argilosos o roques amb una porositat baixa i està interrelacionada amb la meteorització per sals (Hall i Hall, 1996). La meteorització per humectació i dessecació s'empra tot sovint com a argument de la meteorització de les costes rocoses, tot i que no hi ha cap prova empírica de la seva efectivitat sobre substrats més o menys durs (Stephenson i Kirk, 2000b).

Entre els processos químics, hom en destaca la hidratació, la dissolució, la carbonatació, la hidròlisi, així com els processos d'oxidació i reducció. Pel que toca a les costes rocoses, hi trobam pocs treballs que analitzin o intentin caracteritzar instrumentalment els processos químics de meteorització. De la mateixa manera, com passa amb alguns processos físics, aquests també s'expliquen o s'interpreten des d'una estructura conceptual de caixa negra. Tal vegada la carbonatació és un dels processos que agrupa més estudis, especialment a partir de l'impuls dels estudis del micromodelat de les costes rocoses carbonatades (Lundberg, en premsa). La carstificació està relacionada amb els efectes del diòxid de carboni (CO_2) present en solucions aquoses, que interacciona amb el carbonat càlcic en un conjunt de reaccions reversibles en funció de la saturació respecte CO_2 o $CaCO_3$. En principi, l'aigua de mar està sobresaturada de carbonat càlcic (Trudgill, 1985), per la qual cosa no té capacitat de dissoldre la roca. No obstant això, sí que té capacitat agressiva pel que toca al Mg (Trudgill, 1979).

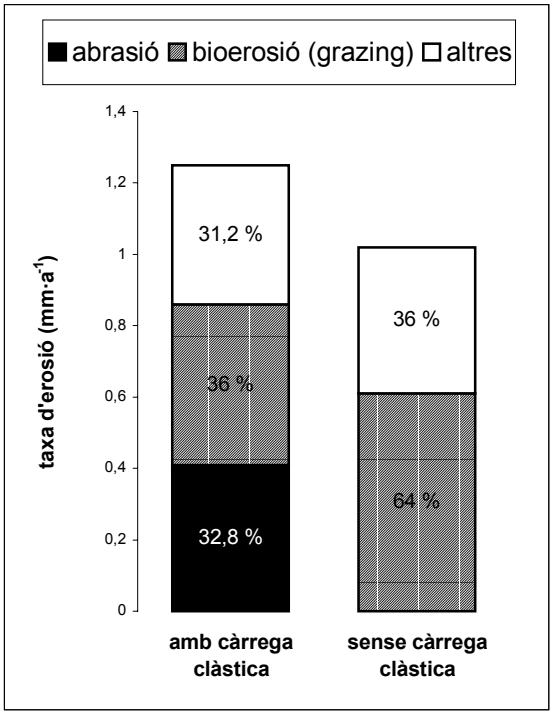


Fig. 1.4 El paper de l'acció mecànica en les taxes d'erosió a les costes carbonatades de l'illa d'Aldabra (Trudgill, 1976a). La presència de material clàstic incrementa en un 20% la taxa d'erosió en les mateixes condicions ambientals per a dos perfils, a la vegada que redueix la contribució del pes relatiu de l'acció biològica.

1.4.4
L'acció biològica

L'acció biològica fa referència a l'influx dels organismes en l'alteració, erosió i forma de la costa rocosa. Aquesta acció pot tenir diferents signes, per la qual cosa hom parla de bioerosió, bioprotecció i bioconstrucció (Naylor *et al.* 2002) tant per als processos de tipus bioquímics com per als biomecànics. Alguns organismes –rodofícies, crustacis filtradors, esculls de bivalves– poden entapissar la superfície de la costa i protegir-la de l'acció mecànica i de la hidràulica. D'altres, arran de la seva etologia, graten la roca per tal d'obtenir-ne el seu aliment, o bé n'ataquen la superfície amb àcids orgànics (Andrews i Williams, 2000; McLean, 1967). També hi ha organismes que tenen el seu nínxol ecològic a la roca i, per tal de protegir-se dels

depredadors, o a causa del seu creixement, alteren la roca. Entre d'altres, hi ha, especialment els cianòfits, certs mol·luscs del gènere *Lithophaga*, o les esponges del gènere *Cliona* (Pohl i Schneider, 2002; Viles, 1987b).

1.4.5
Processos subaeris

Finalment, cal esmentar l'acció dels processos subaeris que desenvolupen la seva acció als penya-segats i plataformes litorals que abracen des de la caiguda de petits fragments de roca, o la reptació dels vessants, fins als grans moviments de masses. Els processos subaeris que operen a les costes estan relacionats amb l'aportació d'aigua de precipitació i d'escolament. De fet, bona part dels moviments de masses semblen ser la resposta a la càrrega hidràulica de la roca (Duperret *et al.,* 2002) mediatitzada per l'estructura i les diàclasis de la roca (Blanco, 2001; Dibb *et al*., 1983; Jones i Williams, 1991). Cal posar de manifest que, tant l'aigua d'escolament com la de precipitació, juguen un paper important pel que fa als mecanismes de meteorització fisicoquímica.

1.5
El paper del rocam i el vector evolutiu

El ritme d'erosió de les costes rocoses i les formes que adopten estan relacionades, d'una banda, amb els processos que modelen el rocam (físics, químics, biològics i antròpics) i, d'altra banda, amb el tipus de roca, l'estratigrafia, l'estructura i el vector temps (Dibb *et al*., 1983). Aquest darrer cal entendre'l des d'una doble perspectiva; en primer lloc, com el temps durant el qual els processos d'erosió-meteorització han actuat sobre la costa i, en segon lloc, com la història climàtica, geològica de la costa i els seus testimonis (Trenhaile, 2002).

El ***tipus de roca*** que aflora als penya-segats o plataformes és extremadament important a l'hora de determinar la taxa d'erosió. A grans trets, les roques ígnies i metamòrfiques, en condicions d'escassa alteració, són més resistents als processos d'erosió marins i subaeris, que no les roques sedimentàries. De la mateixa manera, és més ràpid el desmantellament en les roques sedimentàries no cohesives que en les cohesives. Dickson *et al*. (2004) avaluen el paper de la litologia com a control de la forma de la costa a l'illa de Lord Howe (Pacífic sud-oriental). La majoria de les plataformes litorals, en aquesta illa, es desenvolupen en roques relativament dèbils, com són calcarenites i bretxes calcàries. Mentre que quan afloren els basalts o les seqüències de bretxes piroclàstiques, les plataformes són menys amples o directament es topa amb penya-segats.

El temps d'exposició del rocam als agents i processos de meteorització i erosió, també en varia les propietats geomecàniques, de manera que el vector temporal tampoc no es pot descartar, pel que fa al paper de resposta del rocam. Així, en base a la reducció de la resistència mecànica, mesurada mitjançant un escleròmetre (*Schmidt Hammer*), Dickson i Woodroffe (2005), Thorton i Stephenson (2006) i Trenhaile (2001) posen de manifest com una mateixa litologia respon de manera diferent als processos de meteorització i erosió segons els tipus de costa i els factors ambientals.

Les ***debilitats estructurals internes*** (juntes, fractures i diàclasis) també exerceixen un paper important com a controls primaris de la forma i de les taxes d'erosió de les costes rocoses. Els plans de debilitat afavoreixen i acceleren l'acció de l'onatge i accentuen les irregularitats del rocam (Fookes *et al*.,1988). Sovint, molts penya-segats aplomats es corresponen amb penya-segats estructurals, on el pla de falla delimita la façana del penya-segat (Dickson *et al*., 2004; Fornós *et al*., 2005). En altres ocasions, la fracturació facilita el desmantellament del penya-segat o de la plataforma perquè d'una banda ofereix més superfície de roca a l'atac dels processos i, per l'altra, en redueix la resistència mecànica (Sunamura, 1978). Aquest és el cas d'un sector de penya-segats de Waitemata al nord de la ciutat d'Auckland (Nova Zelanda), on un mateix cos de turbidites presenta perfils de penya-segat i velocitat de retrocés amb proporció a la densitat i orientació de diàclasi i fractures (de Lange i Moon, 2005).

Un dels altres problemes a considerar en l'estudi de les costes rocoses és si les formes que ens ocupen són contemporànies o elements relictes, ***formes heretades***. Atès que les velocitats de canvi són relativament lentes i que el nivell marí es correspon amb nivells d'altres estadis isotòpics, es poden generar distorsions a l'hora de lligar paràmetres morfològics, com l'alçària del penya-segat, el gradient de la plataforma, o bé l'amplària de la plataforma, amb els paràmetres ambientals contemporanis, com són el clima d'onades, l'amplitud mareal o la mateixa resistència mecànica de les roques (Trenhaile, 2002). Els treballs de Trenhaile *et al*. (1999) i Blanco *et al.* (2004) recomanen considerar el vector evolutiu de les costes rocoses en l'estudi morfodinàmic d'aquests tipus de relleus.

1.6
Processos marins *vs*. subaeris

Un dels debats encara vigents entre les diferents escoles que treballen sobre la morfodinàmica de les costes rocoses és el de la preponderància dels processos de meteorització subaeris i/o físics-químics-biològics sobre l'acció hidràulica i viceversa

(Trenhaile, 2002; Stephenson, 2000; Stephenson i Brander, 2003).

El col·lectiu d'investigadors formats a terres australianes i a Nova Zelanda, encapçalat pel Dr. Wayne Stephenson de la Universitat de Melbourne (Austràlia), desenvolupen una línia de treball on s'emfatitza el paper de la meteorització en la morfodinàmica de les costes rocoses, en especial de les plataformes litorals, tot atorgant a les forces hidràuliques just un paper de remoció dels materials alliberats (Stephenson i Kirk, 2000a). En canvi, l'escola que encapçala el Dr. Alan S. Trenhaile de la Universitat de Windsor (Canadà) posa l'èmfasi en el paper de l'onatge, l'amplitud de marea i el clima d'onades en la dinàmica de les costes rocoses. Així mateix, també en destaca el control litològic i l'estructural (Trenhaile, 2004b). Mentre, l'escola "austro-neozelandesa" parteix del seguiment instrumental de l'erosió i l'alteració del rocam a les costes rocoses, l'escola "atlàntica" posa l'èmfasi en les relacions entre variables morfològiques (com el pendent i l'amplada de les plataformes) i paràmetres ambientals, com l'amplitud de marea.

No obstant això, la necessitat de reduir la distorsió de factors com la meteorització per sals o les pròpies marees ha dut ambdues escoles a treballar en la morfodinàmica de les costes rocoses a llacs (Allan *et al.*, 2002; Trenhaile, 2004a), posant de manifest que, en diluir-se el paper dels agents costaners habituals, guanyen importància d'altres relacionats amb el rocam, la neotectònica o el pes de les formes heretades.

Recentment, ambdues escoles tendeixen a convergir arran de les relacions entre l'amplitud de marea i l'abast dels processos de meteorització per humectació i dessecació (Trenhaile, 2005) i els resultats dels experiments de laboratori que en reprodueixen les condicions i cicles ambientals (Kanyaya i Trenhaile, 2005). De tota manera, l'escola, més tost marina, encara manté el discurs de la preponderància de l'onatge tot qüestionant l'eficiència del processos de meteorització en la configuració de les formes del relleu litoral.

1.7 Objectius de l'estudi i aproximació metodològica

El coneixement científic de les costes rocoses des d'una perspectiva morfodinàmica, i especialment en el nostre marc geogràfic, ens obliga a plantejar el nostre treball des d'una perspectiva inductiva. D'aquí ve que no s'arrenqui d'una hipòtesi de treball, sinó d'uns objectius que permetin consolidar el coneixement que tenim sobre les costes rocoses carbonatades de Mallorca.

Així doncs els objectius de la present memòria són:

1. Identificar els principals agents i processos d'erosió-meteorització que intervenen en el modelat de les costes rocoses carbonatades de Mallorca.

2. Quantificar-ne la contribució en les taxes de denudació del rocam litoral.

3. Establir paral·lelismes amb els processos i agents que operen en altres tipus de costes rocoses.

4. Caracteritzar les principals expressions morfològiques associades als agents i processos d'erosió i meteorització que modelen les costes carbonatades de Mallorca.

L'estudi del modelat de les costes carbonatades de Mallorca és un projecte ambiciós, el marc general d'aproximació metodològica del qual s'esbossa a la Fig. 1.5. Fornós i Gómez-Pujol (2002) en presenten les principals fites, que són la combinació d'una perspectiva descriptiva i l'altra de dinàmica, a tres ordres de magnitud d'escala diferent (macro, meso i micro escala).

En una primera fase s'ha procedit a la cartografia de les formes del relleu de la costa a escales d'1:1000 i 1:250. El resultat és una base de dades entorn a la distribució de les formes del relleu, el control estructural i litològic i les variacions espacials de la línia de costa. Hi segueix un aixecament topogràfic de models digitals del terreny i de perfils de costa a partir dels quals es delimita la zonació biològica i morfològica, com també se'n quantifiquen les propietats de formes com les plataformes litorals o la façana dels penya-segats. Finalment, les observacions de microscopi electrònic de rastreig o l'estudi petrogràfic del rocam permet obtenir informació qualitativa dels processos i agents de meteorització.

A l'hora de quantificar les taxes de denudació, el seu abast temporal i espacial, sobre la base de la informació descriptiva anterior, s'avalua el retrocés dels penya-segats mitjançant l'anàlisi de fotografia aèria, entrevistes amb residents a la costa, trampes de sediment, tests d'exposició, seguiments temporals amb micròmetre (TMEM) i l'escàner làser i l'avaluació de les taxes de bioerosió.

La present memòria no recull tota la informació que es deriva del desenvolupament d'aquest marc de treball que, des de l'any 1998, es desenvolupa a les costes rocoses de Mallorca per un nodrit grup d'especialistes sota la coordinació del Dr.Joan Fornós.

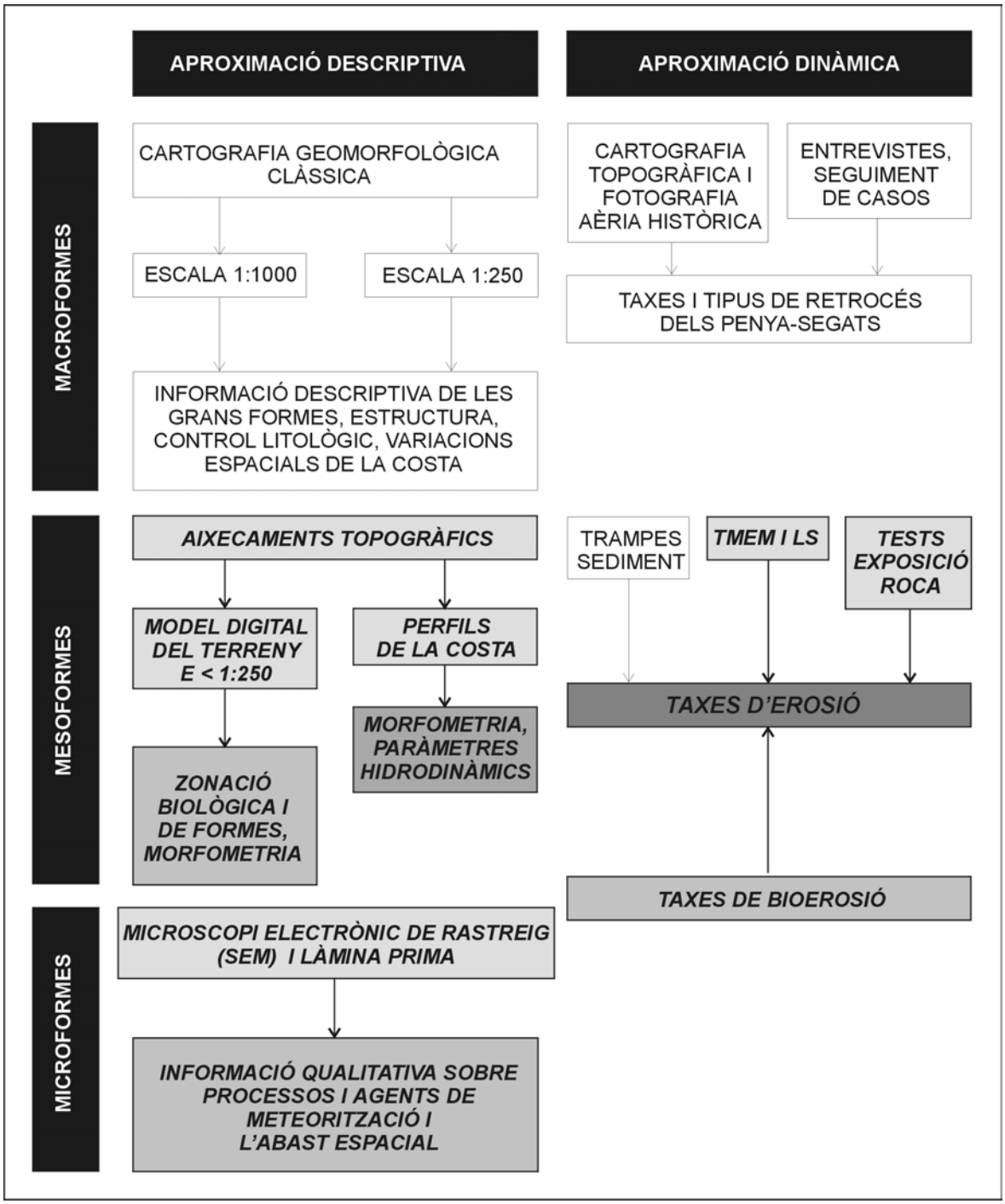


Fig. 1.5 Aproximació metodològica a l'estudi morfodinàmic de les costes carbonatades de Mallorca (Fornós i Gómez-Pujol, 2002). Els quadres en cursiva i negreta corresponen als continguts de la present memòria. SEM: microscopi electrònic de rastreig.

De fet, i com s'indica a la Fig. 1.5, part d'aquest corpus documental correspon a la memòria de tesi que, en paral·lel, ha desenvolupat Pau Balaguer (Balaguer, 2006) i que abasta la component vertical dels penya-segats pel que fa a les seves velocitats i a la tipologia de retrocés.

Així doncs, un cop marcades les línies generals d'aproximació metodològica, a cada capítol de la present memòria, s'especificarà el mètode emprat arran de la casuística que es dóna en els diferents escenaris d'estudi i les particularitats dels agents i processos de meteorització que s'hi han identificat.

2 Dinàmica erosiva de les costes rocoses

2.1 Introducció

D'ençà de trenta anys enrere fins a l'actualitat, la investigació sobre la morfodinàmica de les costes rocoses ha comptat amb nombroses contribucions que han maldat per quantificar les taxes de denudació del rocam litoral, especialment des de la introducció de la tècnica instrumental del micròmetre –MEM– dissenyat per High i Hanna (1970). Fins llavors, les taxes de denudació de les costes rocoses partien de fonts indirectes (Taula 2.1) com l'estudi de la meteorització de superfícies datades per inscripcions –memorials, tombes o indicadors– (Emery, 1941), l'anàlisi química de l'aigua retinguda als cocons (Revelle i Emery, 1957) o els canvis d'altura relativa registrats mitjançant agulles d'erosió (Hodgkin, 1964).

Les taxes de denudació, enteses com l'erosió vertical de les superfícies subhorizontals de la superfície de la roca, han estat calculades per un bon nombre d'investigadors (Trudgill, 1976a i b; Robinson, 1977a i b; Kirk, 1977; Spencer, 1981 i 1985; Gill i Lang, 1983; Viles i Trudgill, 1984; Mottershead, 1989; Stephenson i Kirk, 1996 i 1998; Neves *et al*., 2001; Foote *et al*., 2001; Andrade *et al*., 2002; Swantesson *et al*., en premsa), sobre diferents tipus de roques i arreu del globus (Taula 2.2).

Trudgill (1976a; 1976b) utilitzà el MEM i els tests d'exposició de roca (*weight-loss rock tablets*), per tal d'avaluar la contribució relativa de la bioerosió, l'abrasió i la meteorització a les costes carbonatades d'Aldabra. Kirk (1977) desenvolupà el primer mostratge espacial al llarg de les plataformes litorals i posà de manifest que les taxes d'erosió són majors als extrems interiors (peu de penya-segat) i exteriors de la plataforma (*seaward drop*), que no en els espais intermedis. Robinson (1977a i 1977b), per la seva banda, proposà que l'erosió de les plataformes litorals responia a la meteorització (humectació i dessecació) i a l'abrasió hidràulica, tot quantificant el paper de cada una d'elles. També demostrà la importància de la disposició de sediment pel que fa al paper de l'acció mecànica sobre les costes rocoses (Robinson, 1977c). Spencer (1981 i 1985) fou el primer d'emprar el micròmetre de dial mòbil, TMEM, (Trudgill *et al.*, 1981) a les costes rocoses que, respecte del MEM, suposa la possibilitat d'obtenir un major nombre de mesures d'erosió. Spencer en el seus treballs destaca la importància de l'onatge com a agent de remoció, ja que les majors taxes d'erosió a Grand Cayman es donen sempre després dels grans temporals. Ara bé, no hi ha evidències visuals de l'acció mecànica dels processos hidràulics. Mottershead (1989) lliga les taxes d'erosió que registra a la costa gal·lesa a la meteorització per sals, atès que les taxes d'erosió més importants del perfil de costa estudiat es donen al domini supramareal. Stephenson i Kirk (1996; 1998) i Inkpen *et al*. (2004) són els primers a detectar variacions estacionals en l'erosió de les plataformes litorals de Kaikoura a Nova Zelanda. Durant l'estiu, les taxes d'erosió són força més grans que durant l'hivern, període en el qual es donen els temporals més energètics a la zona. Aquest fet s'utilitza com a argument de la importància dels processos de meteorització subaèria, en especial de la meteorització per sals i de la meteorització per humectació i dessecació (*wetting and drying*).

2.2 Tècniques instrumentals per al càlcul de taxes d'erosió a les costes rocoses

La realització de mesures acurades de les taxes de denudació de superfícies rocoses, o bé l'obtenció de mapes de detall de la microtopografia de les superfícies, és un dels objectius més importants dels estudis centrats en els processos erosius i de meteorització. No gaire temps enrere i, encara avui per avui, bona part de les estimacions de taxes de denudació s'obtenien mitjançant tècniques o evidències indirectes (Williams *et al*., 2000). Exemples en són el càlcul dels soluts en suspensió als cursos fluvials (Goudie, 1990) i el desmanegament de superfícies susceptibles de ser datades, com és el cas de les tombes (Williams & Robinson, 2000) o dels monuments històrics (Lageat *et al*., 1994; Takahashi *et al*., 1994), o bé de les superfícies polides pel gel glacial (Swantesson, 1992). Tanmateix, l'escala i fiabilitat d'aquestes mesures és força relativa i els valors que s'hi aboquen fan referència a una escala temporal secular, de dècades o, en el millor dels casos, anual.

El desenvolupament de tècniques instrumentals, com el micròmetre (*micro-erosion meter*, MEM), ha transformat els estudis dels processos de meteorització i erosió de les superfícies rocoses ja que permet l'obtenció de taxes directes de denudació a escales anuals, estacionals i, en alguns casos, també diàries. Des de la seva invenció a la dècada dels seixanta (High & Hanna, 1970), el MEM ha esdevingut un dels aparells estàndard per a la quantificació dels processos de meteorització i d'erosió en un ample espectre d'ambients dinàmics.

Autor	Mètode	Taxa ($mm \cdot a^{-1}$)	Litologia	Localitat
Emery (1941)	Alteració d'inscripcions datades	0,3	Calcarenites	La Jolla, Califòrnia (EUA)
North (1954)	Pèl·lets fecals gastròpodes	0,6	Calcarenites	Califòrnia (EUA)
Revelle i Emery (1957)	Anàlisi química aigua cocons	0,3	Calcàries	Illes Marshall (EUA)
Hodgkins (1964)	Agulles d'erosió	0,6 a 1,0	Calcàries	Norkfolk, Austràlia

Taula 2.1 Taxes d'erosió de la superfície de les costes rocoses a partir de fonts indirectes.

Tot i que hi ha autors que són partidaris del disseny original, altres prefereixen utilitzar la versió modificada del MEM, el micròmetre de dial mòbil (TMEM, *Traversing micro-erosion meter*) desenvolupat per Trudgill *et al*. (1981). Amb posterioritat, s'hi han afegit diferents innovacions tècniques, com són els rellotges comparadors digitals i el registre automàtic de les dades en ordinadors personals (Stephenson, 1997).

D'uns anys ençà, els avenços en la tecnologia làser han permès als geomorfòlegs gaudir d'un mètode alternatiu per a l'obtenció directa de taxes d'erosió a partir de la microtopografia d'una mateixa superfície de roca en diferents episodis temporals (Swantesson, 1994). En comparació amb els dos tipus de micròmetres (MEM i TMEM), en què les dades s'obtenen de forma manual i requereixen del contacte físic entre la superfície de la roca i el mecanisme de mesura, el rastreig de les superfícies, mitjançant làser, permet que l'operació sigui dirigida a través d'un ordinador i evita les distorsions derivades del contacte mecànic de l'instrument de mesura amb la roca. Gómez-Pujol *et al*. (2002b) avaluen els avantatges i els inconvenients de l'ús de les tres tècniques esmentades per a l'estudi de l'erosió i la meteorització a les costes rocoses. Entre d'altres variables (Taula 2.3), posen de manifest el grau de resolució, el volum de dades obtingudes, la capacitat de mostratge espacial, etc. D'un instrument a un altre hi ha una gradació quant a les prestacions. Del MEM a l'escàner làser, tot passant pel TMEM, canvia substancialment el volum de dades amb què es treballa i, per tant, la fiabilitat de les mesures. De la mateixa manera, la capacitat de mostratge espacial, que és major i factible –en termes econòmics i temporals– per als micròmetres, es redueix dràsticament per a l'escàner làser.

Una de les darreres tècniques que s'ha desenvolupat, tot i que encara es troba en una fase experimental, és l'obtenció de microtopografies a partir de tècniques fotogramètriques (Inkpen *et al*., 2000). El principi d'aquesta aproximació consisteix a obtenir fotografies paral·leles en el pla de la superfície, mitjançant una lent que no tengui distorsions o bé a partir de la rectificació geomètrica del fotograma. A partir d'uns punts de control, s'assignen valors d'altura relativa i es converteix el fotograma en un model digital d'elevacions.

Tot i així es reprodueixen les fonts d'error de la fotogrametria tradicional derivats de la calibració de les lents, l'ajust dels aparells esteoroscòpics, o les distorsions derivades de l'escala i l'orientació (Lane *et al*., 1993).

Autors	Tècnica	Interval mostratge (anys)	Taxa ($mm \cdot a^{-1}$)	Litologia	Localitat
Andrade et al., 2002	MEM	2	0,20 – 4,00	Turbidites	Portugal
Foote *et al*., 2001	MEM	2	0,68 – 8,83	Calcàries cretenques	Normandia i Sussex
Neves *et al*., 2001	TMEM	1	0,153	Turbidites	Tombadoiros, Portugal
Stephenson i Kirk, 1998	TMEM	2	1,130	Calcàries i lutites	Kaikoura, Nova Zelanda
Stephenson i Kirk, 1996	MEM	20	1,480	Calcàries i lutites	Kaikoura, Nova Zelanda
Mottershead, 1989	TMEM	7	0,625	Esquists	Start-Prawle, Devon, UK
Viles i Trudgill, 1984	MEM	11	1,970	Calcàries	Aldabra Atoll, Oceà Índic
Gill i Lang, 1983	MEM	2	0,370	Arenisques	Otway, Victòria, Austràlia
Spencer, 1985	TMEM	1.25	0,09 – 1,77	Calcàries	Grand Cayman, Carib
Spencer, 1981	TMEM	1.25	0,38	Calcàries	Grand Cayman, Carib
Kirk, 1977	MEM	2	1,53	Calcàries i lutites	Kaikoura, Nova Zelanda
Robinson, 1977b	MEM	1	0,0 – 0,9	Turbidites	Yorkshire, UK
Trudgill, 1976	MEM	2	1,01 – 1,25	Calcàries	Aldabra Atoll, Oceà Índic

Taula 2.2 Taxes d'erosió de la superfície de les costes rocoses calculades mitjançant MEM i TMEM.

Propietats	MEM	TMEM	LS
Resolució (mm)	0.0025 a 0.001	0.0025 a 0.001	0.025
Volum màxim de dades	3	1.000	1.000.000
Cobertura espacial	Àmplia	Àmplia	Limitada
Temps mitjà de mostratge	5 minuts	15 minuts	2 hores
Submergible	Sí	Sí	No
Discriminació de processos	No	No	No
Fonts d'error	Importants	Baixes	Escasses
Transport	Senzill	Senzill	Complicat
Preu aproximat	450 €	1060 €	24000 €

Taula 2.3 Avaluació dels avantatges i inconvenients de les diferents tècniques instrumentals per a l'estudi de l'erosió.

2.2.1
Els micròmetres d'erosió (MEM i TMEM)

El ***micròmetre d'erosió*** (*micro-erosion meter*, MEM) és un instrument que fou dissenyat a finals de la dècada dels seixanta pels geògrafs de la Universitat de Bristol, C. High i F.K. Hanna, amb la finalitat de mesurar taxes d'erosió, relativament baixes, sobre substrats durs.

L'estructura física del MEM consisteix en una base d'acer amb forma de triangle equilàter que descansa sobre tres potes cilíndriques ubicades a cada vèrtex (Figura 2.1). Aquesta base té subjecte en el centre un rellotge comparador (comercialitzat i d'ús comú a la indústria) que, mitjançant un forat a la base, pot recolzar el cursor o agulla indicadora sobre la roca (High i Hanna, 1970).

Les taxes d'erosió s'obtenen a partir de la lectura del dial calibrat que, ancorat a la base, descansa sobre tres grampons de cap esfèric fixats a la roca. La relocalització exacta del MEM sobre tres punts respon als principis cinemàtics de Kelvin-Clamp (Ford, 1971). Aquests consisteixen en l'execució de sis controls cinemàtics en les potes del MEM: tres sobre la component de translació i altres tres sobre la component de rotació. Aquests controls es materialitzen gràcies a la forma de cada una de les potes del MEM; una presenta una depressió cònica de 120º, una altra una entalladura en forma de "v" amb un angle intern també de 120º i, finalment, la tercera és completament plana. Aquest mètode de relocalització té com a principal avantatge que la precisió de l'instrument és independent de la cura amb què s'han elaborat cada un dels elements del dispositiu. El dial del rellotge comparador no està situat al centre de la base per la qual cosa, amb la rotació de l'instrument sobre els grampons de relocalització, es poden obtenir tres valors d'altura relativa.

La precisió de l'instrument varia en funció del dial, que pot tenir resolucions de 0,001 mm a 0,00001 mm (Trudgill, 1977). High i Hanna (1970) posen de manifest que les principals fonts d'error del MEM són degudes a les variacions de temperatura o al propi impacte de l'agulla del MEM sobre la superfície, fet que fa augmentar la taxa d'erosió. Els mateixos autors reconeixen que, amb rangs de temperatura entre 10 ºC i 20 ºC, l'error causat per l'impacte de l'agulla sobre la superfície de la roca, a substrats blans, adquireix magnituds considerables. No obstant això, l'impacte de l'agulla del MEM no ha de considerar-se un problema greu, encara que disminueix la precisió tècnica de l'instrument, perquè pot reduir-se amb l'ús acurat (Mottershead, 1989; Stephenson i Kirk, 1996).

Un dels principals problemes del MEM és el reduït nombre de dades que poden obtenir-se'n per cada punt de mostratge. Per aquest motiu, Trudgill *et al.* (1981) modifiquen la versió original del MEM, independitzant el rellotge comparador de la base. El ***micròmetre d'erosió de dial mòbil*** (*traversing micro-erosion meter*, TMEM) descansa sobre tres braços separats entre ells per intervals de 120º (Fig. 2.2). El dial calibrat pot ubicar-se en diferents posicions, cada un dels braços del qual descansa entre les esferes fixades en el marc de la base. El centre de la base està retallat per tal de permetre el desplaçament del dial. Amb la ubicació dels braços en sentit perpendicular al costat de la base, queda definit el sistema de coordenades on es registraran els valors d'altura relativa. El nombre d'observacions depèn de les dimensions de la base del TMEM i del nombre d'esferes instal·lades a cada un dels tres laterals de la base triangular.

Stephenson (1977) millora el dispositiu incorporant un dial digital associat a un ordinador, per la qual cosa es dóna la possibilitat de registrar un major nombre d'altures relatives de forma automàtica.

Spate *et al.* (1985) avaluen les principals fonts del MEM i del TMEM i conclouen que:

a) Atès que les mesures es fan sobre un punt fix, existeix la possibilitat que les dades

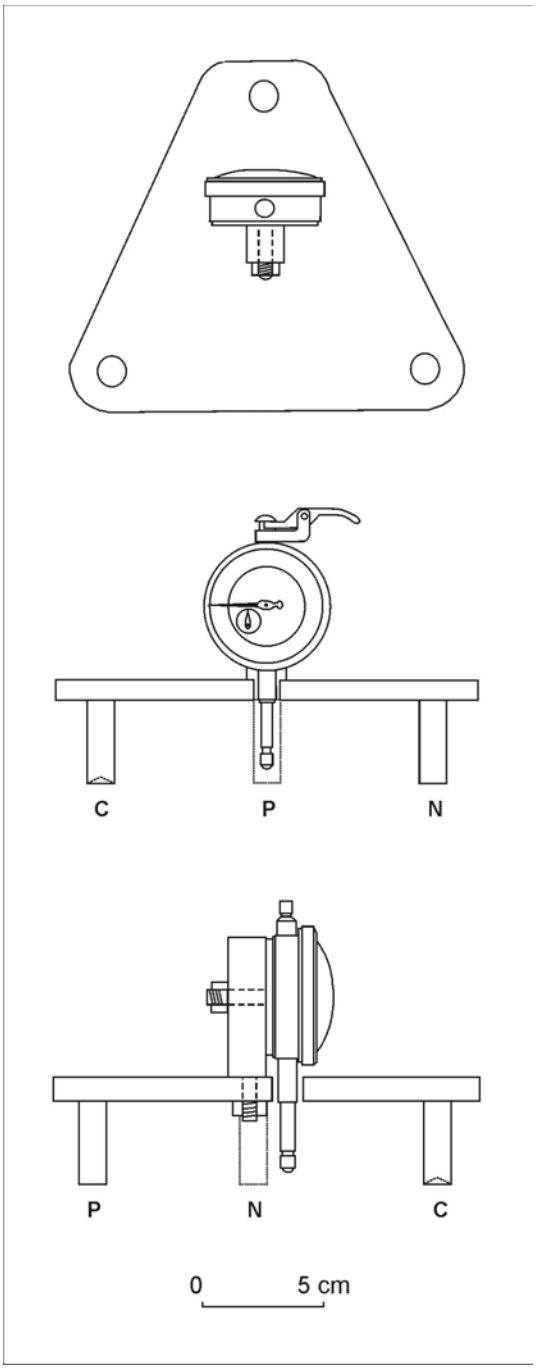


Fig. 2.1 Micròmetre d'erosió de dial fix (MEM: *micro-erosion meter*). C: base de la pota amb forma cònica; P: en forma plana; N: en forma d'entalladura.

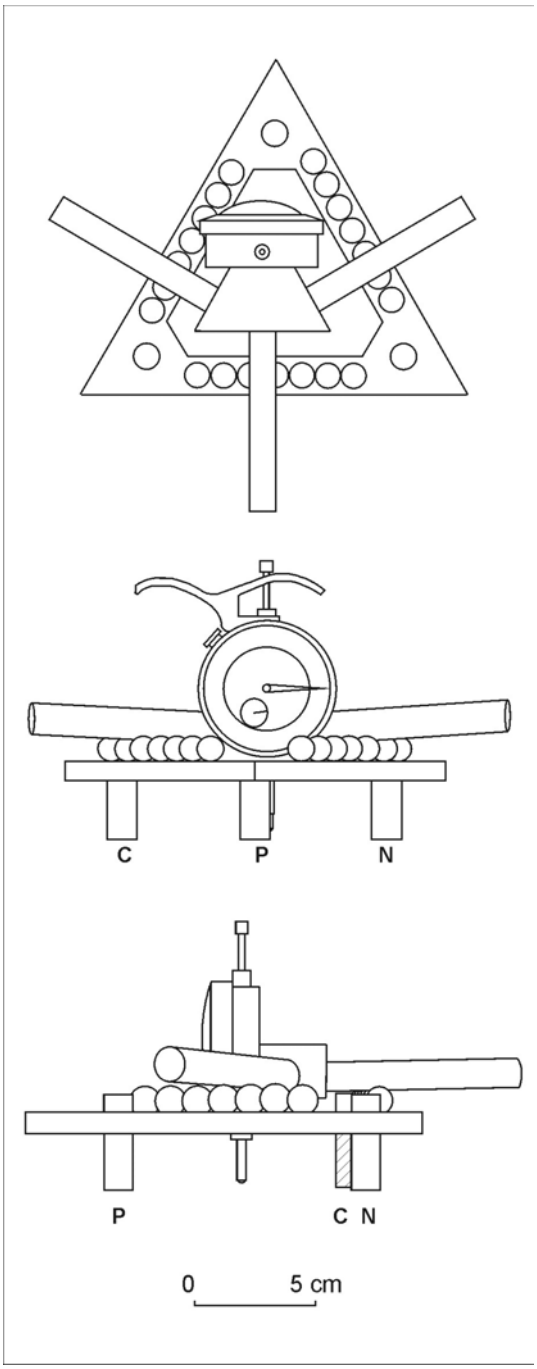


Fig. 2.2 Micròmetre d'erosió de dial mòbil (TMEM: *traversing micro-erosion meter*). C: base de la pota amb forma cònica; P: en forma plana; N: en forma d'entalladura.

siguin selectives, en el sentit que les taxes d'erosió es poden correspondre a l'erosió diferencial de distints minerals o grans de roca.

b) La instal·lació dels perns de relocalització sobre substrats blans, fràgils o molt porosos és complicada. De més a més, cal afegir que sobre aquests tipus de substrat augmenta l'error, associat a l'impacte de l'agulla de l'instrument.

c) És necessari un nombre considerable de lectures per unitat d'àrea perquè les dades obtingudes, mitjançant el MEM o el TMEM, en siguin representatives.

d) Un dels problemes més comuns, i a considerar en intervals de lectura dilatats, és

l'alteració del material dels grampons i de les esferes sobre les quals descansa el dispositiu.

e) Les taxes d'erosió poden patir variacions relacionades amb processos d'escala temporal, més petites que les del marc d'estudi (p.e. cicles de contracció i expansió de la roca).

f) Cal evitar la tendència a instal·lar els punts del MEM o TMEM sobre superfícies planes, atès que no sempre són representatives del medi a estudiar i introdueixen biaixos en el mostratge.

g) El creixement de líquens o altres tipus de pàtines orgàniques pot incidir en el seguiment del procés d'erosió.

h) L'instrument es veu afectat pels canvis de temperatura. És convenient el seu calibratge periòdic.

És recomanable caracteritzar el grau de meteorització per a cada un dels punts del MEM i recollir mostres de roca per dur-hi a terme observacions mitjançant microscopi electrònic de rastreig (SEM), a fi i efecte d'identificar els agents i factors que operen sobre l'àrea de mostratge (Moses *et al*., 1995).

2.2.2 L'escàner làser (LS)

L'escàner làser (LS) és un dispositiu que permet obtenir dades d'altura relativa de la superfície rocosa, superant els principals inconvenients que plantegen els micròmetres d'erosió: el contacte directe amb la superfície de la roca i el volum de dades.

El model d'escàner làser, dissenyat per Jan O.H. Swantesson de la universitat sueca de Karlstad (Fig. 2.3), consisteix en un emissor-sensor làser que es desplaça en les components *x* i *y* sobre un marc d'alumini, mitjançant dues corretges accionades per un motor electrònic de precisió (Swantesson, 1994). L'emissor-sensor làser emet un feix d'electrons de longitud d'ona de 20 mW. Aquest, en topar contra la superfície de la roca, rebota i és recollit pel sensor del qual es coneix l'angle. A partir d'aquí es determina el centre de gravetat del feix d'electrons, paràmetre que, a la vegada, serà utilitzat per la unitat de processament associada al dispositiu i es transformarà en un valor d'altura o elevació de la roca, tot prenent com a referència la posició de l'emissor làser. El marc de l'escàner làser descansa sobre quatre potes afaiçonades que permeten disposar l'aparell en un pla paral·lel a la superfície de la roca. L'escàner làser s'alimenta mitjançant dues bateries de 12 V. Durant el rastreig, els valors d'altura relativa (*z*) i les seves coordenades associades, *x* i *y*, es registren a la unitat operativa de l'ordinador que, a la vegada, actua de base de dades i conté el programari que regula el moviment dels motors elèctrics.

L'àrea màxima que l'escàner làser pot registrar és de 400 x 400 mm. L'interval mínim de malla és de 0,4 mm. La relocalització de l'aparell segueix els mateixos principis del MEM als quals s'afegeixen quatre punts de control sobre la superfície a escanejar. L'escàner pot mesurar rangs d'alçària màxima de 180 mm amb una resolució vertical de 0,025 mm i amb l'horitzontal de 0,1 mm. Williams *et al*. (2000) avaluen l'error associat a la relocalització. Així, determinen que es poden donar errors en les components *x* i *y* de ± 0,0025 mm i de 0,04 mm a la *z*. Canvis en la temperatura entorn a 10ºC poden causar errors a *x* i *y* al voltant de 0,1 mm i a la *z* de 0,03 mm. En situacions particulars, com en superfícies exageradament anguloses, es pot perdre el registre de la component *z* pels efectes de reflexions secundàries (Swantesson, 1994).

L'escàner làser necessita noranta minuts per escanejar una superfície de 400 x 400 mm amb una resolució d'un valor de *z* per a cada mm. Aquesta densitat de malla suposa un volum de dades de 160.000 valors d'altura relativa. El dispositiu pesa aproximadament 15 kg, als quals s'han d'afegir el pes de les bateries, la caixa de control i l'ordinador (si fa no fa 17 kg més). Aquest fet dificulta el transport de l'instrument al camp.

Les principals aplicacions de l'escàner làser són la realització de models digitals del microrelleu, estudis de microrugositat (Gómez-Pujol, 2001) i el càlcul de taxes d'erosió mitjançant la superposició de sèries temporals de les microtopografies (Swantesson, 2005).

Fig. 2.3 Dispositiu de l'escàner làser i el seus components. A l'esquerra de la imatge, el marc sobre el qual es desplaça l'emissor-sensor làser i el sistema de potes que n'assegura la relocalització. A la dreta de la imatge, l'ordinador, la caixa de motors i les bateries.

2.2.3
Els tests d'exposició (WLRT)

L'ús de peces de roca per detectar petits canvis en el seu pes (*weight-loss rock tablets*, WLRT) a causa de l'erosió de les superfícies rocoses és un mètode versàtil que permet l'avaluació de diferents processos, en diferents ambients i amb diferents litologies.

El principi bàsic dels tests d'exposició consisteix a sotmetre una petita peça circular de roca a un determinat ambient dinàmic (Trudgill, 1975). De la roca, se'n coneix el pes amb anterioritat i posterioritat al període d'exposició. El diferencial de pes entre ambdues fites temporals s'atribueix a l'acció dels agents de meteorització. Les taxes d'erosió poden donar-se en $mg \cdot a^{-1}$ o en $mm \cdot a^{-1}$, si se'n coneix la densitat, o bé les relacions de volum i pes de les peces de roca. Mitjançant l'ús de malles de niló, se'n pot separar la contribució de diferents agents de meteorització i erosió. Una malla amb una obertura inferior a 63 μm permet protegir les peces de roca de l'acció abrasiva dels calibres corresponents a les arenes (Fig. 2.4). Tanmateix, alguns autors prescindeixen de les malles de niló i exposen directament les peces de roca a les condicions ambientals (Moses, 1996).

Cal posar de manifest, a favor de la tècnica, que els factors d'error són reduïts i que petits canvis en el pes poden ser detectats en episodis temporals de curt abast si s'empra una balança amb prou precisió (Inkpen, 1995). Un dels principals problemes d'aquesta tècnica rau en l'estandardització de les dimensions i propietats litològiques. La preparació de les peces de roca (tallar, eixugar i empaquetar) representa un important consum de temps (Moses, 2000).

2.3
Patrons i taxes d'erosió a costes rocoses calculades mitjançant TMEM: s'Alavern (Mallorca)

S'han desenvolupat dos experiments per tal d'avaluar els patrons i les taxes d'erosió a les costes rocoses mitjançant l'ús del micròmetre de dial mòbil. El primer dels experiments consisteix a determinar la taxa d'erosió en un interval temporal llarg, d'un any. El segon experiment escurça el marc temporal a un seguiment horari durant un cicle de vint-i-quatre hores.

2.3.1
Àrea d'estudi

La costa, a s'Alavern, destaca per la presència d'una línia contínua de penya-segats verticals de 15 a 20 m

Fig. 2.4 Dispositiu de peces de roca, protegides per una malla de niló, fixades a una superfície de roca supralitoral de la costa sud de Mallorca. L'escala de la imatge és de 20 cm.

d'alçària que descansen sobre una plataforma litoral de 3 a 10 m d'amplària. L'àrea d'estudi es troba a l'est del nucli de Cala Pi (Llucmajor), just a tocar del llindar que separa la possessió de Vallgornera de la urbanització del mateix nom (Fig.2.5).

El rocam que dóna cos als penya-segats de s'Alavern correspon als materials carbonatats de la sèrie del Complex Terminal del Miocè Superior –Calcàries de Santanyí (Fornós, 1983)–, així com a les eolianites pleistocenes (Nielsen *et al*. 2004). La seqüència general es divideix en tres unitats deposicionals (Fornós i Pomar, 1983) que de base a sostre són: el Complex de Manglar, la Unitat Estromatolítica i la Unitat Oolítica.

El Complex de Manglar, a la zona d'estudi, s'alça prop de 8 m des del nivell marí. És un nivell poc uniforme i l'integren diferents nivells d'estructura tabular, bé de biocalcarenites amb bioturbació vertical, de fangs carbonatats bioturbats, de nivells calcarenítics bioclàstics o nivells d'argiles verdes amb còdols negres. Aquesta alternança de nivells, juntament amb la seva disposició tabular, és la responsable de la disposició subhoritzontal de la plataforma litoral de s'Alavern, atès que aquesta s'ha desenvolupat aprofitant la presència d'un nivell tou de fangs carbonatats. L'alternança de capes toves i més resistents es manifesta en petites balmes, tot i que sense trencar la component de marcada verticalitat (Fig. 2.6).

La franja que comprèn dels 8 als 11 m snm correspon als materials de la següent unitat, l'Estromatolítica Inferior, formada per laminites criptoalgals sobre la qual, amb una potència que oscil·la dels 13 als 16 m snm, tenim els materials de la Unitat Oolítica: biocalcarenites amb abundants estructures de corrent, d'aparença cohesiva, que accentuen la verticalitat dels penya-segats.

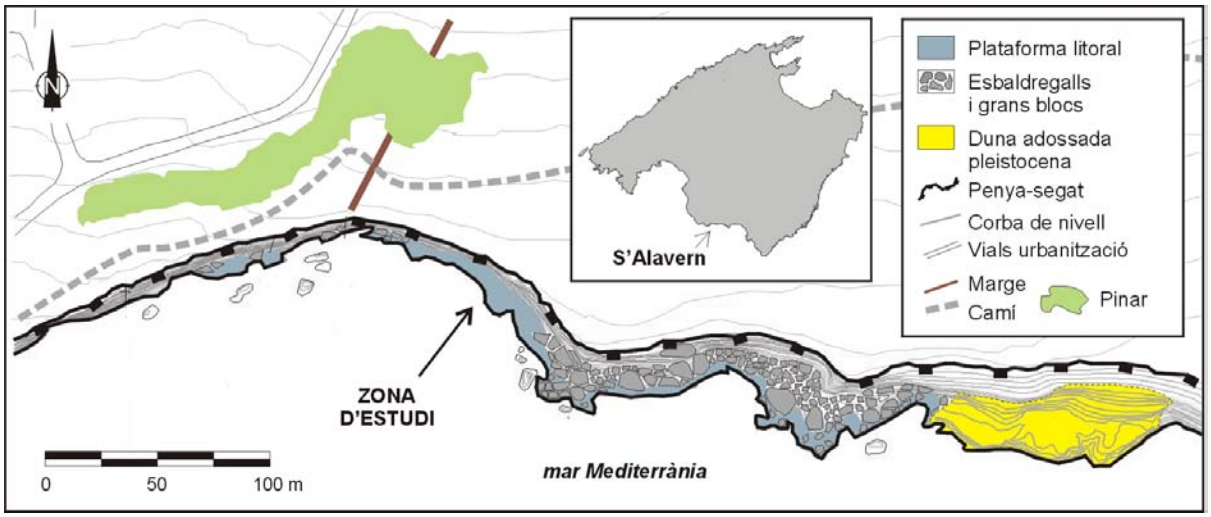


Fig. 2.5 Croquis geomorfològic de la zona d'estudi a s'Alavern (Llucmajor, Mallorca).

Sobre elles, i després d'un contacte erosiu, topam amb la seqüència alternant de paleosòls i nivells dunars del Pleistocè mitjà (Cuerda, 1975; Nielsen *et al*., 2004). Cal fer menció que són abundants –encara que d'extensió reduïda– els exemples de dunes adossades als penya-segats, que fossilitzen antigues posicions d'aquests o de la pròpia plataforma litoral que apareix activa a d'altres indrets. Aquestes dunes corresponen, probablement, al Pleistocè Superior, atenent a criteris de context estratigràfic (Clemmensen *et al*. 2001). Aquest fet, juntament amb la presència a la plataforma de marmites, cocons i *notchs* fossilitzats per les dunes quaternàries, apunta cap a la conclusió que les plataformes litorals de s'Alavern són formes heretades que han estat reactivades per l'actual nivell marí.

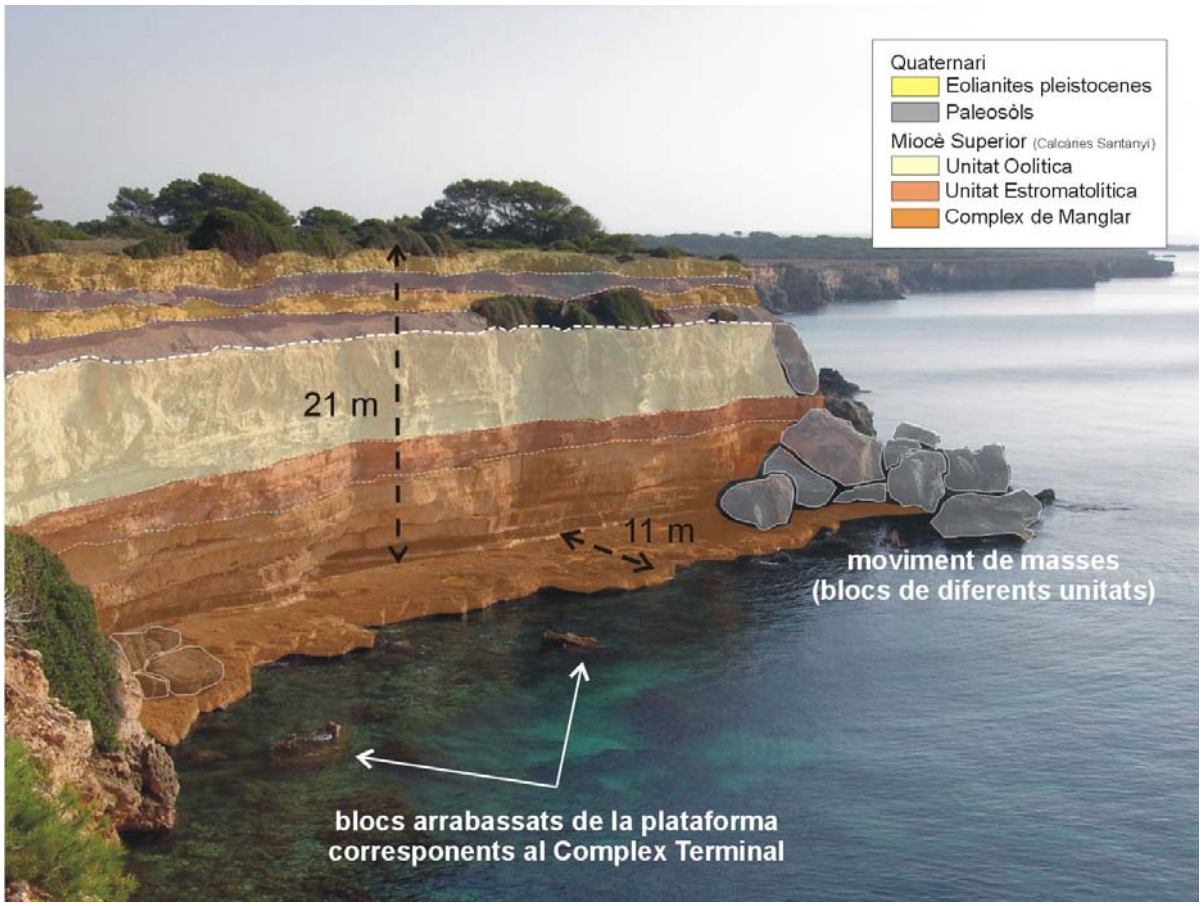


Fig. 2.6 Croquis geològic de la zona d'estudi a s'Alavern (Llucmajor, Mallorca).

La línia de costa de s'Alavern és força rectilínia, quasi bé controlada exclusivament per fractures de direcció 058º, que sols queden articulades per una segona família de fractures de menys importància amb 137º de direcció mitjana. L'alçària del penya-segat disminueix des de Vallgornera fins a s'Estalella, on es troben les dunes pleistocèniques a cotes properes als 15 m per sobre del nivell del mar i descendeixen de forma gradual fins a alçàries de pocs cm per sobre del nivell marí. Aquesta disposició de la costa respon al basculament neotectònic cap a ponent de la zona (Servera i Rodríguez, 1998) que es manifesta, entre d'altres, per la desconnexió del sistema dunar de s'Estalella a s'Estanyol respecte de la línia de costa, en la marcada linealitat dels cursos fluvials, o bé per l'aixecament dels dipòsits quaternaris a les contrades de s'Estalella i Cala Pi (Zazo *et al*. 2003).

Pel que fa als agents climàtics, les temperatures mitjanes són de l'ordre de 17,5ºC i les precipitacions anuals de 700 mm (Guijarro, 1986). Durant els mesos freds, les temperatures mitjanes no són inferiors als 7,4 ºC, mentre que als mesos més calorosos s'arriben a mitjanes de 30,2 ºC. Pel que fa a les condicions marines, es tracta d'un ambient relativament tranquil amb alçària d'onada significativa de l'ordre de 0,73 m, tot i que els paràmetres més freqüents són de 0 o 0,5 m. Això no obstant, durant els temporals, amb direccions de propagació habituals de SW i SE, l'alçària màxima d'ona pot arribar als 5,12 m a mar oberta.

2.3.2
Materials i disseny experimental

Les superfícies a caracteritzar es troben a 0,75 m sobre el nivell del mar, just a tocar del peu d'un penya-segat de 21 m d'alçària i sobre una plataforma horitzontal d'11 m d'amplària (Fig. 2.7). És una zona que habitualment roman emergida, encara que en situacions d'onatge no gaire energètic hi arriben els esquits i alguna onada. La superfície és completament agranada durant les tempestes. Hi són abundants els cocons i la roca no presenta una microrugositat gaire accentuada. Són abundants els individus del gastròpode *Melaraphe neritoides* i puntuals els de *Melaraphe punctata*. Pel que fa a la colonització de la roca per cianobacteris, fongs i líquens, sembla important, arran del color grisós de la roca, quan les fractures fresques són ben blanquinoses.

El nivell sobre el qual estan instal·lats els grampons del TMEM són unes calcarenites del Miocè Superior, amb una composició bioclàstica on destaca l'abundància de foraminífers. La roca presenta un elevat grau de micritització, amb una porositat intergranular parcialment ocupada per cristalls de calcita. Entre d'altres característiques geomecàniques,

Fig. 2.7 Perfil de costa del sector de penya-segats i plataformes de s'Alavern on s'ha desenvolupat el seguiment instrumental de l'erosió de la costa rocosa. Notau la intensa colonització biològica, que s'aprecia pel contrast de color entre la superfície de la roca i la fractura fresca en el límit marí de la plataforma o en la mateixa façana dels penya-segats.

en destaca un contingut en carbonats del 98,10%, una porositat del 28,47 %, una densitat d'1,568 $g \cdot cm^{-3}$ i un valor de rebot d'esclerómetre, tipus L, (*Schmidt hammer*) de 41,37 que a l'escala de Selby (1982) es correspon amb una roca de resistència moderada (Day, 1980).

El TMEM utilitzat fou elaborat pel laboratori d'enginyeria industrial de la Universitat de Sussex (Anglaterra). Abasta una superfície de 135 cm^2 i permet el registre de 148 valors d'altura relativa. Tot plegat ens ofereix un mostratge espacial d'un valor d'altura relativa per cada cm^2. Es tracta d'un TMEM modificat d'acord amb Stephenson (1997) mitjançant la incorporació d'un rellotge comparador digital (Mitutoyo® ID-C1025) i un programari de transmissió de dades (Winkey© v.1.45) que permet el registre automàtic de les lectures a un ordinador portàtil. S'han instal·lat els grampons de relocalització de l'aparell en una superfície supralitoral, al peu del penya-segat.

A fi i efecte d'avaluar l'error de registre de l'instrument i la possible distorsió atribuïble al contacte físic de l'agulla del TMEM amb la roca, s'han repetit un mínim de deu vegades les lectures d'altura relativa en 20 coordenades diferents, a 23 ºC, sobre un bloc de calibratge de la mateixa litologia i característiques del rocam sobre el qual es desenvolupa l'experiment al camp. L'error de registre de l'instrument s'ha quantificat en ± 0,002, amb un error mínim de 0,001 i un màxim de 0,004 mm (Taula 2.4).

El seguiment de les superfícies rocoses mitjançant el TMEM a s'Alavern s'ha dut a terme en tres ocasions:

Coordenada	L1	L2	L3	L4	L5	L6	L7	L8	L9	L10	μ	σ
A1 - B8 - C8	6,837	6,834	6,833	6,838	6,837	6,834	6,832	6,835	6,832	6,833	*6,835*	*0,002*
A3 - B5 - C9	6,850	6,84	6,841	6,844	6,844	6,843	6,842	6,841	6,842	6,843	*6,843*	*0,003*
A3 - B6 - C8	6,695	6,692	6,692	6,695	6,695	6,694	6,693	6,691	6,692	6,694	*6,693*	*0,001*
A4 - B8 - C5	6,387	6,381	6,382	6,385	6,384	6,384	6,382	6,38	6,382	6,384	*6,383*	*0,002*
A5 - B7 - C5	6,340	6,341	6,339	6,342	6,342	6,341	6,34	6,338	6,339	6,340	*6,340*	*0,001*
A5 - B10 - C2	6,165	6,163	6,163	6,167	6,166	6,165	6,164	6,163	6,163	6,165	*6,164*	*0,001*
A6 - B9 - C2	6,125	6,123	6,123	6,126	6,125	6,125	6,123	6,123	6,123	6,125	*6,124*	*0,001*
A7 - B3 - C7	6,603	6,598	6,600	6,603	6,601	6,601	6,600	6,597	6,599	6,599	*6,600*	*0,002*
A8 - B3 - C6	6,471	6,469	6,47	6,474	6,471	6,471	6,470	6,467	6,469	6,470	*6,470*	*0,002*
A9 - B4 - C4	6,299	6,297	6,298	6,301	6,300	6,300	6,299	6,296	6,298	6,299	*6,299*	*0,001*
A3 - B7 - C7	6,595	6,592	6,592	6,596	6,595	6,594	6,593	6,591	6,592	6,593	*6,593*	*0,002*
A3 - B8 - C6	6,521	6,518	6,519	6,521	6,522	6,521	6,52	6,518	6,519	6,521	*6,520*	*0,001*
A4 - B5 - C8	6,689	6,69	6,688	6,689	6,691	6,688	6,688	6,686	6,687	6,689	*6,689*	*0,001*
A4 - B9 - C4	6,326	6,324	6,324	6,327	6,324	6,324	6,323	6,322	6,322	6,324	*6,324*	*0,002*
A6 - B4 - C7	6,549	6,56	6,56	6,563	6,563	6,561	6,56	6,559	6,561	6,561	*6,560*	*0,004*
A6 - B5 - C6	6,436	6,433	6,434	6,438	6,437	6,436	6,435	6,433	6,434	6,436	*6,435*	*0,002*
A6 - B8 - C3	6,179	6,175	6,176	6,18	6,179	6,177	6,176	6,176	6,177	6,179	*6,177*	*0,002*
A7 - B7 - C3	6,179	6,176	6,178	6,176	6,176	6,175	6,175	6,172	6,173	6,175	*6,176*	*0,002*
A8 - B4 - C5	6,351	6,348	6,35	6,352	6,35	6,35	6,349	6,348	6,349	6,35	*6,350*	*0,001*
A9 - B3 - C5	6,383	6,382	6,384	6,386	6,386	6,384	6,384	6,382	6,384	6,383	*6,384*	*0,001*
											Error instrumental mitjà	***± 0,002***

Taula 2.4 Registre d'altures relatives (mm) de l'experiment per avaluar l'error instrumental en la repetició de mesures.

el 18 de maig de 2004, el 7 de juny de 2005 i el 24 d'agost de 2005. Les dues primeres dates es corresponen amb l'experiment d'abast anual i la tercera amb el seguiment horari.

Per al càlcul de les taxes d'erosió s'han utilitzat dos procediments. D'una banda, el càlcul de la diferència mitjana d'altura relativa a partir dels valors dels mostratges corresponents a l'any 2004 i 2005; i, d'altra banda, el càlcul de la diferència de volum entre les superfícies –microtopografies– que, mitjançant el programari Surfer® v.7, s'han construït a partir de les coordenades i els valors d'altura relativa per a cada un dels mostratges. Per convertir els valors de volum en valors lineals, amb la finalitat de comparar les taxes d'erosió entre ambdós procediments, s'ha dividit la diferència de volum entre superfícies per l'àrea de mostratge.

Paral·lelament a l'aixecament de microtopografies, s'han recollit mostres de roca properes a la superfície estudiada per al seu estudi mitjançant microscopi electrònic de rastreig (SEM), làmina prima i difracció de raigs X.

2.3.3
Taxes d'erosió anuals a la costa de s'Alavern

Les quatre superfícies de roca estudiades al sector suposen un conjunt de 1.184 registres d'altura relativa i 592 valors de taxes d'erosió (Annex 1). La diferència entre les cotes relatives obtingudes el 18 de maig de 2004 i les del 7 de juny de 2005 són discretes. Bona part de les observacions tenen valors propers a l'error instrumental o cauen dins els intervals que Gómez-Pujol *et al.* (en premsa)

	SA TMEM 1	SA TMEM 2	SA TMEM 3	SA TMEM 4
N	148	148	148	148
Taxa d'erosió mitjana ($mm \cdot a^{-1}$)	0,151	- 0,006	0,247	0,018
Desviació estàndard	0,331	0,224	0,188	0,255
Mínim ($mm \cdot a^{-1}$)	- 0,787	- 1,613	- 0,487	- 1,810
Màxim ($mm \cdot a^{-1}$)	1,006	1,183	0,782	1,195
Taxa d'erosió neta surfer ($mm \cdot a^{-1}$)	- 0,136	- 0,001	-0,187	- 0,009
Taxa d'erosió negativa surfer ($mm \cdot a^{-1}$)	0,058	0,022	0,019	0,042
Taxa d'erosió positiva ($mm \cdot a^{-1}$)	- 0,194	- 0,023	- 0,206	- 0,051

Taula 2.5 Taxes d'erosió a s'Alavern calculades per la diferència dels valors d'altura relativa i per la diferència de volum entre microtopografies corresponents als mostratges del 18.05.04 i del 07.06.05.

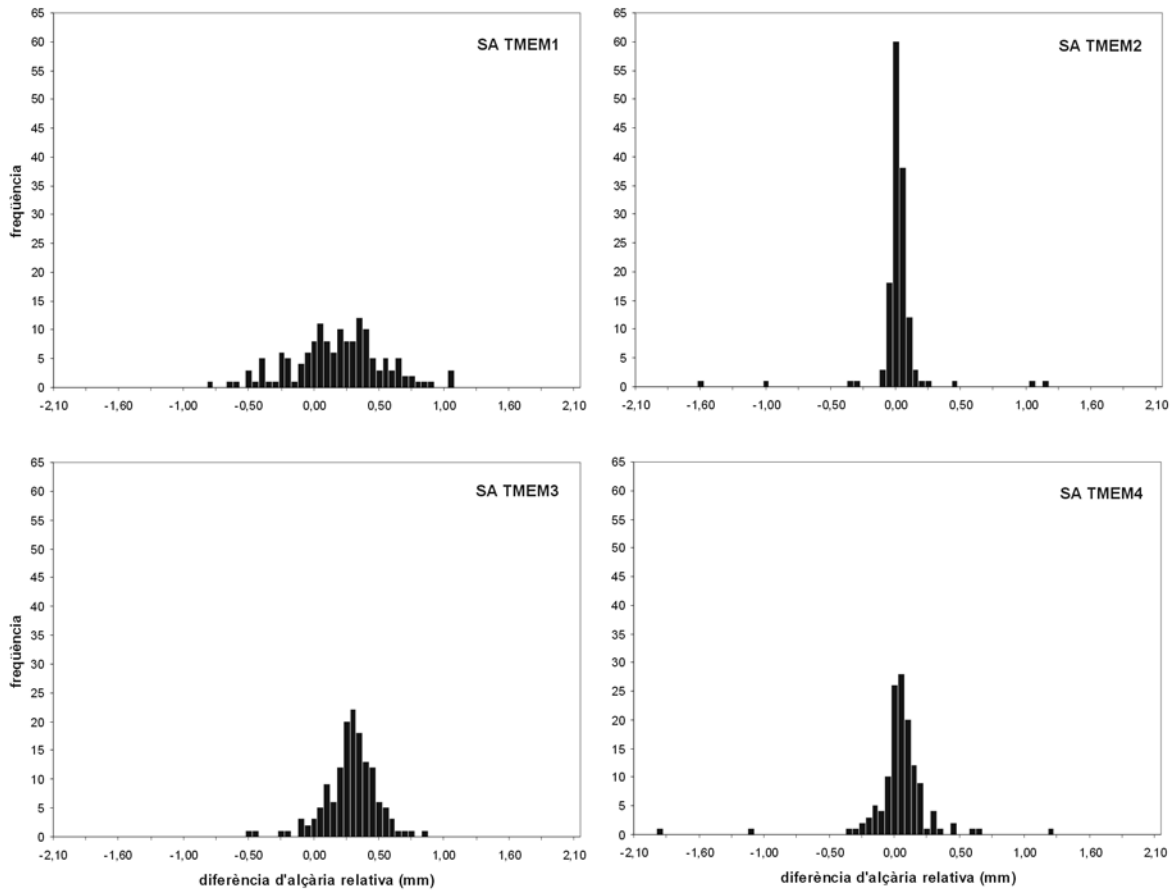


Fig. 2.8 Distribució de freqüències dels valors de diferència d'altura relativa (mm) entre el 18.05.04 i el 07.06.05 a S'Alavern.

recomanen no considerar per tal d'evitar les distorsions derivades de la insolació, les característiques del clima o del mateix manipulador del TMEM. Així doncs, per un 19,59% dels punts de la superfície SA_TMEM_1 no podem parlar amb propietat de canvis en el valor d'altura relativa. La superfície supralitoral SA_TMEM_2 sembla no haver experimentat una degradació acusada. Un 81,18% dels registres cauen dins l'interval de precaució en la interpretació de les taxes d'erosió. Per la seva banda, les superfícies SA_TMEM_3 i SA_TMEM_4 tenen un 23% i un 47,76%, respectivament, dels seus valors en els límits de confiança per asssignar un vector de canvi a la superfície de roca.

Aquesta primera aproximació que de forma gràfica es pot derivar dels histogrames de les diferències d'altura relativa (Fig. 2.8), ja posa de manifest tres fets: la minsa erosió de la superfície SA_TMEM_2, uns valors d'erosió baixos per a les altres superfícies en comparació amb altres litologies carbonatades semblants i l'existència de variacions d'altura relativa de la superfície de la roca en sentit positiu i en sentit negatiu.

Les taxes d'erosió de les superfícies aquí estudiades, calculades a partir de les diferències de registre per a l'interval temporal definit, oscil·len de -1,810 a -0,478 mm·a^{-1} (Taula 2.5), mentre que també es donen taxes d'acreció de la roca amb un rang de 1,183 a 0,782 mm·a^{-1}. Els valors mitjans per a les superfícies estudiades resulten positius excepte per a SA_TMEM_2 amb un descens de 0,006 mm a^{-1}. Les superfícies SA_TMEM_1, SA_TMEM_3 i SA_TMEM_4 tenen una diferència d'altura relativa de 0,151, 0,247 i 0,018 mm·a^{-1} respectivament. Pel que fa a la desviació estàndard respecte de la mitjana, el fet que aquesta sigui força major –de vegades dos ordres de magnitud– respecte de la taxa d'erosió mitjana, posa de manifest una important variabilitat espacial pel que pertoca a les diferències d'alçària relativa. A la figura 2.9 es fa palesa la variabilitat de la tendència dels registres entre les lectures de TMEM. Els canvis s'hi concentren de forma puntual, sense un domini sectorial clar dels moviments en positiu o negatiu.

Les taxes d'erosió, calculades per superposició de les microtopografies, són lleugerament diferents de les derivades de la diferència de registre entre les lectures del TMEM. La diferència entre ambdós procediments respon, en primer lloc, al fet que no comparam punts específics sinó superfícies i, en segon lloc, al mètode d'interpolació que s'hagi utilitzat per construir la

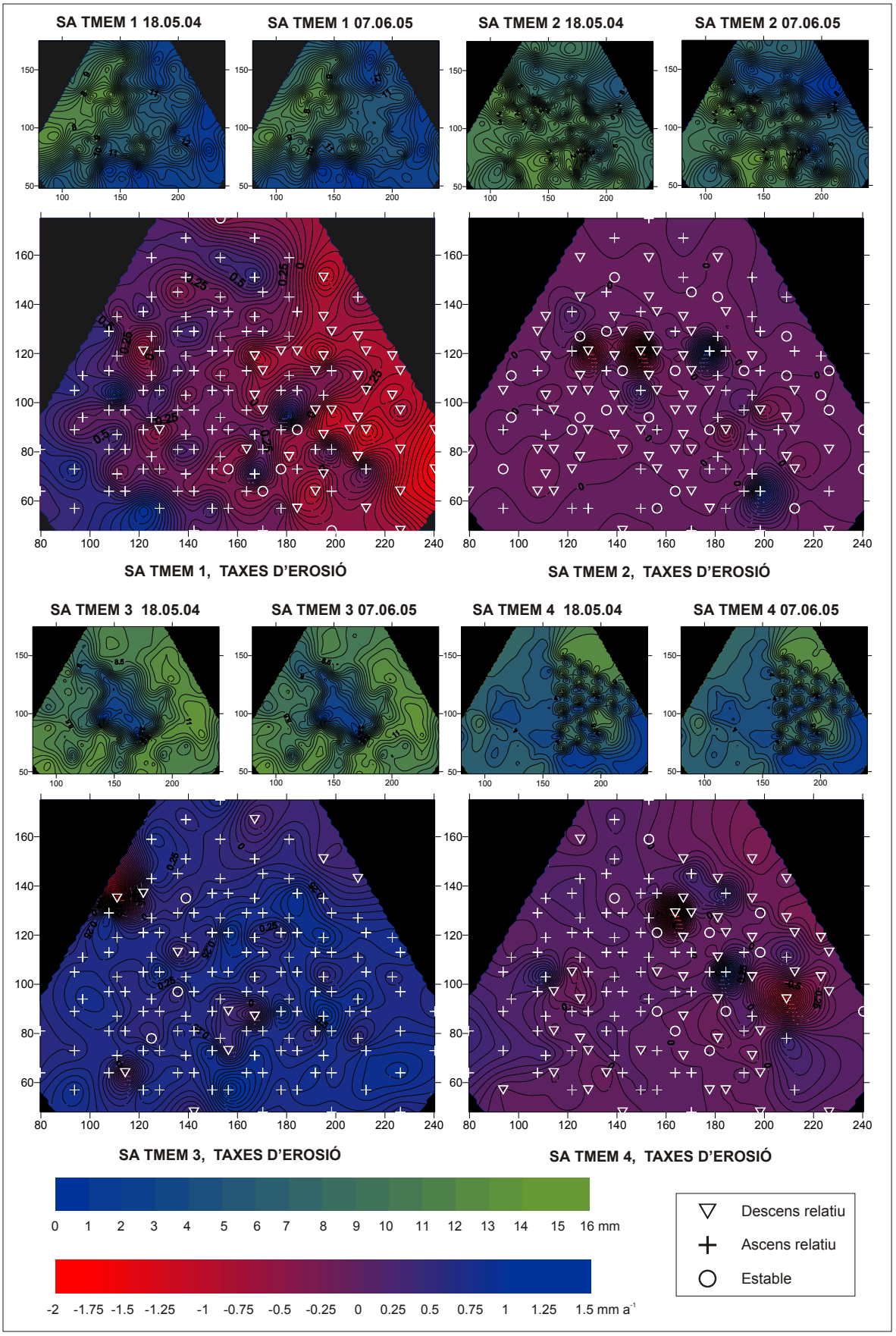


Fig. 2.9 Superposició de les microtopografies corresponents als mostratges i variacions d'atura relativa. Els símbols representen la tendència en termes relatius de cada coordenada: > 0.001 mm = ascens; 0,010 a – 0,010 mm = estable i < -0,010 = descens.

	SA TMEM 1		SA TMEM 2			SA TMEM 3		SA TMEM 4	
	18.05.04	07.068.05	18.05.04	07.06.05	24.08.05	18.05.04	07.06.05	18.05.04	07.06.05
1r quartil	12,27	12,27	7,01	6,63	6,54	10,860	10,95	10,12	10,16
2n quartil	10,95	11,23	4,94	4,88	4,88	9,02	8,96	5,22	5,25
3r quartil	9,67	10,02	3,56	3,55	3,55	7,42	7,58	3,53	3,56
4t quartil	7,89	8,29	2,16	2,55	2,20	4,04	4,09	1,08	1,18

Taula 2.6 Mitjanes aritmètiques dels valors d'altura relativa dels registres compresos a cada un dels quartils (25% de les dades).

microtopografia. Seguint Stephenson (1997) utilitzam el model *kriging* per a la interpolació de les cotes d'alçària relativa. Les taxes d'erosió o les diferències d'altura relativa, així calculades (Taula 2.5), oscil·len entre els valors d'erosió de -0,023 a -0,206 mm·a^{-1} de SA_TMEM_3 i SA_TMEM_2, respectivament, i els ascensos relatius de 0,019 a 0,058 mm·a^{-1} de SA_TMEM_3 i SA_TMEM_1. Pel que fa a les taxes netes, calculades mitjançant la superposició de microtopografies, per a SA_TMEM_2 i SA_TMEM_4 les taxes, tot i negatives, són tan baixes que no hi ha una erosió significativa; mentre que en els casos de SA_TMEM_1 i SA_TMEM_3 les taxes d'erosió, tot i que baixes, són de dos ordres majors amb taxes d'erosió netes de -0,136 i -0,187 mm·a^{-1}.

De l'anàlisi de la distribució en quartils dels valors d'altura relativa (Taula 2.6), es pot apreciar que la mitjana aritmètica dels valors compresos en el 1r quartil a les superfícies SATMEM1 i SATMEM4 es manté estable, mentre que a SATMEM2 i SATMEM3 s'hi donen canvis més importants.

D'altra banda, totes les superfícies coincideixen a presentar un aixecament, respecte dels registres d'alçada relativa prèvia, a les cotes de menor altura (Fig. 2.10), la qual cosa es posa de manifest per un increment de la mitjana aritmètica del 4t quartil. En altres paraules, allò que la distribució dels quartils deixa entreveure és que tant els punts més alts, com els més baixos i els intermedis pateixen els desplaçaments positius. No hi ha un grup d'alçades on s'aglutini el retrocés o l'aixecament de la superfície. És més, tampoc no sembla haver-hi un comportament homogeni entre superfícies, malgrat estar tan properes les unes de les altres.

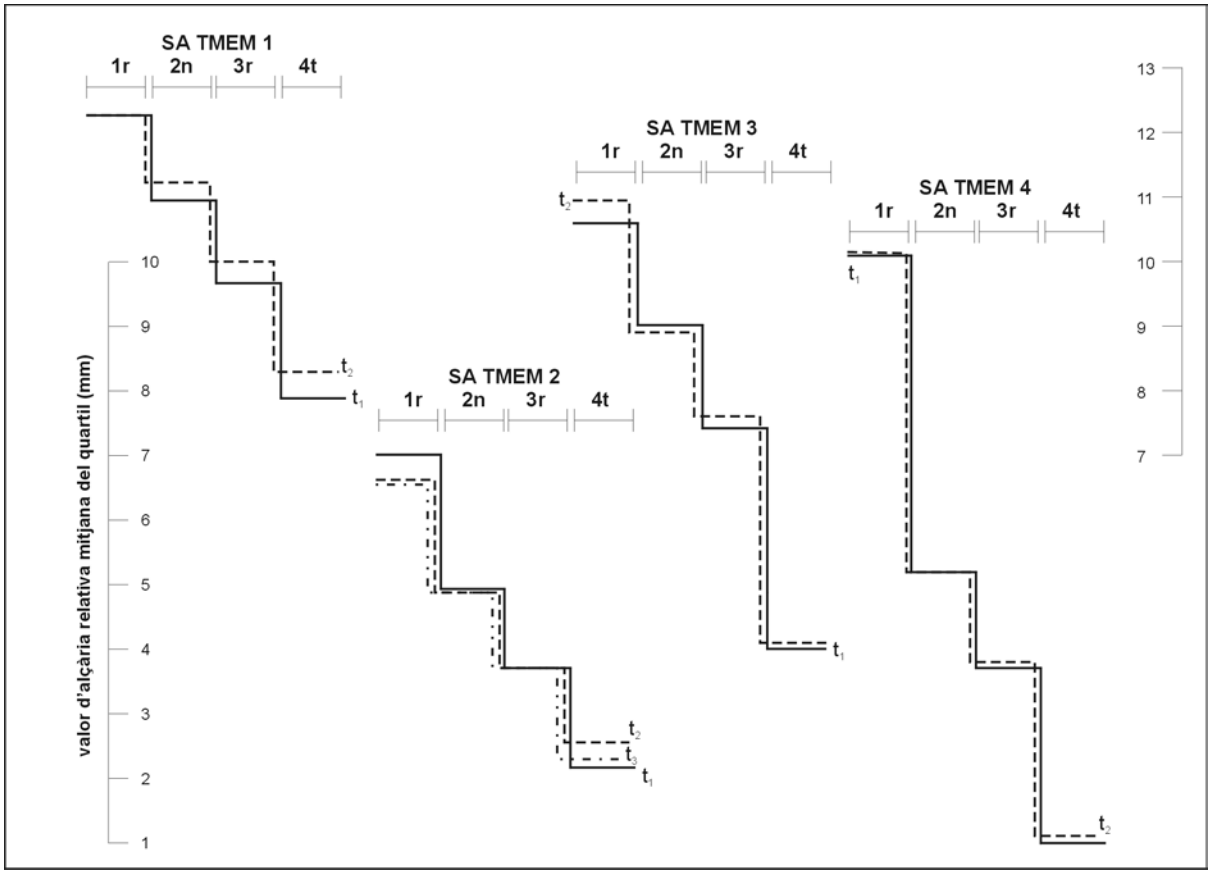


Fig. 2.10 Distribució de la microtopografia a les superfícies estudiades en funció de la distribució en quartils dels valors d'altura relativa. t_1 = 18.05.04, t_2 = 07.06.05 i t_3 = 24.08.05.

Tendència dels punts	SA TMEM 1	SA TMEM 2	SA TMEM 3	SA TMEM 4
Ascens relatiu	69,50 %	34,96 %	90,47 %	55,23 %
Descens relatiu	26,35 %	45,27 %	07,48 %	35,82 %
Desplaçament no significatiu	04,15 %	19,77 %	02,05 %	08,95 %

Taula 2.7 Freqüència relativa dels registres en funció de la tendència d'ascens, descens o estabilitat entre les dates de mostratge.

Així doncs, els canvis a la superfície de roca supralitoral a s'Alavern no tenen un patró clar en la seva alteració. Tanmateix, i com ja hem considerat en el comentari de les taxes d'erosió, en termes absoluts, aquests canvis són modests.

De les observacions anteriors, un dels fets que en destaca és l'elevació de registres d'altura relativa respecte de lectures anteriors. Drysdale i Gillienson (1997) recullen taxes d'acreció de la roca amb el TMEM en un context de deposició travertínica i Trudgill *et al*. (2001) identifiquen ascensos, respecte dels registres inicials del TMEM, als carreus de la Seu de Londres i ho relacionen amb el creixement de líquens crustacis o amb la deposició de productes de la meteorització del rocam. Tot i que sobre substrats tous, l'ascens cíclic de la superfície és un fenomen conegut i mesurat (Pejon i Zuquette, 2002), en materials cohesius forts, la quantificació de l'ascens de la superfície de la roca, mitjançant el MEM o el TMEM, sols s'ha descrit per un reduït nombre d'autors (Kirk, 1977; Mottershead, 1989; Smith *et al*., 1995; Stephenson, 1998). La causa d'aquests ascensos s'atribueix al creixement de pàtines d'algues, sals o al contingut d'aigua de la roca.

El primer treball monogràfic sobre el fenomen el desenvolupen Stephenson i Kirk (2001). En aquest sentit utilitzen el terme "bombament de la superfície rocosa" (*rock surface swelling*) per descriure l'elevació relativa d'un punt de la superfície rocosa respecte d'una mesura prèvia de la seva cota. Arran de l'intens dispositiu espacial de TMEM a la costa de Kaikoura, Spethenson i Kirk (2001) hi poden avaluar l'abast temporal i espacial del *rock surface swelling*. Un dels punts més impactants és que, en seguiments dilatats de la microtopografia de la superfície rocosa, s'hi poden registrar taxes d'erosió, de descens, de l'altura relativa respecte anteriors episodis d'aixecament, però per sobre de registres d'altura relativa inicial a cotes més baixes. És a dir, s'hi superposen dos cicles: un de *swelling* i l'altre d'erosió. Dels 24.055 registres d'altura que empren Stephenson i Kirk (2001) un 17% experimenta episodis d'ascens. Els valors màxims d'ascens són de 8,9 mm, tot i que són més freqüents aixecaments de 3 i 4 mm. Pel que fa a l'abast temporal, hi ha punts de la superfície que romanen més enllà d'un any respecte de la posició inicial, i d'altres que ho fan entre 3 i 4 mesos. Mitjançant l'anàlisi estadística, s'hi detecta l'existència d'una estacionalitat significativa pel que fa a la distribució temporal del *swelling*; els mesos d'estiu el fenomen és més freqüent que no pas durant l'hivern. Aquest argument és el que empren els autors per associar el *rock surface swelling* a l'expansió dels cristalls de sals a l'interior de la roca i a l'expansió i contracció de la roca, arran dels processos d'humectació i dessecació. Així, que es consideri el principal mecanisme de la meteorització subaèria de les plataformes litorals de Kaikoura.

En successius treballs s'escurça l'escala temporal on es registren els fenòmens de *rock surface swelling* (Stephenson *et al*., 2004). Aquest cop s'assaja d'estudiar el procés sobre substrats prou diferents: les calcàries de Kaikoura i les arenites arcòsiques de Marengo. Durant una setmana es realitzen a diari microtopografies de les superfícies rocoses i se'n detecten variacions, estadísticament significatives, a escala diària a ambdues localitats. Els desplaçaments arriben a superar els 2 mm i es dóna el cas que hi ha punts que, després d'un descens de l'erosió, pugen per sobre de la posició del primer registre. Aquest seguit d'observacions posa de manifest que el fenomen de *rock surface swelling* s'ha de donar en un interval temporal més curt que el diari i que el procés d'humectació i dessecació segueix essent el candidat amb més probabilitats de ser el responsable del procés.

2.3.4
Variacions horàries de microtopografia a s'Alavern

Les taxes d'erosió anual evidencien l'existència d'una tendència d'ascens en moltes de les coordenades i en els valors d'altura relativa de les superfícies

Fig. 2.11 Descamació del rocam supralitoral de s'Alavern.

estudiades. A s'Alavern, la superfície amb un menor percentatge de cotes que experimenten un ascens relatiu és SA_TMEM_2, amb un 35% dels registres. Per a SA_TMEM_3, en canvi, la magnitud dels ascensos és més important amb un 90% dels punts amb tendència positiva (Taula 2.7). D'altra banda, és freqüent trobar descamacions a la superfície de la costa de s'Alavern (Fig. 2.11), fragments despresos de roca de pocs mm de gruixa i de pocs cm^2 de superfície, que s'associen a l'acció de la meteorització per sals o a processos d'humectació i dessecació de la roca (Goudie i Viles, 1997, Stephenson i Kirk, 2001).

Així doncs, la costa de s'Alavern es presenta com un escenari adient per desenvolupar-hi el segon experiment, dissenyat per avaluar la dinàmica erosiva de les costes rocoses, que consisteix a realitzar un seguiment dels moviments relatius de la microtopografia en intervals horaris. Per aquest motiu, s'ha seleccionat la superfície SATMEM2 ja que és la que té una proporció semblant de coordenades amb tendències ascendents i descendents.

Fig. 2.12 Dispositiu de seguiment horari dels canvis de microtopografia i variables ambientals a s'Alavern. A la fotografia superior, s'hi pot observar el micròmetre de dial mòbil sobre la superfície estudiada i el protector d'insolació directa dels termòmetres i registre d'humitat relativa. La fotografia inferior és un detall del dispositiu de control de variables ambientals. D'esquerra a dreta el sensor per a la mesura de la temperatura a la superfície de la roca, a -1,5 cm i a –3,5 cm. El dispositiu sense sensor extern registra la temperatura i humitat ambiental i la insolació.

L'experiment es desenvolupà el 24.08.05 de les 07:00h a les 22:00h i s'hi aixecaren microtopografies cada dues hores d'acord amb l'instrument i les característiques tècniques explicades a l'apartat anterior. En paral·lel, i per primer cop en els estudis de canvi de microtopografia en escales temporals curtes, s'ha fet un seguiment de les variables d'humitat i temperatura ambiental i d'intensitat de llum (flux lluminós), mitjançant un sensor compacte amb registre automàtic de dades HOBO® 4235. L'interval de registre de les variables ambientals és d'un minut. El sensor s'ha ubicat a l'ombra per tal d'evitar l'escalfament de l'aparell a causa de la insolació directa (Fig. 2.12). La temperatura de la roca s'ha registrat mitjançant un altre sensor compacte amb registre automàtic de dades HOBO® 4235. Els sensors s'han ubicat a la superfície de la roca (protegits per un pegat de massilla) i a sengles forats, a 1,5 i 3 cm de profunditat, d'acord amb les experiències d'Smith i McGreevy (1983) i Kerr *et al*. (1984). Els forats, tot i ser d'un diàmetre semblant al del sensor, s'han emplenat amb una mescla de resina plàstica conductiva i pols de la mateixa roca, per tal d'evitar distorsions entre la temperatura de la roca i la temperatura ambiental (Warke, 2000). També s'han recollit fragments de roca per a la seva exploració amb microscopi electrònic de rastreig (SEM).

2.3.4.1 Paràmetres ambientals

Durant l'experiment, les variables ambientals han registrat un cicle ben definit en el qual les corbes d'humitat relativa i les de temperatura i insolació segueixen tendències inverses (Fig. 2.13).

La temperatura ambiental ha oscil·lat de 21,33 ºC a 34 ºC, mentre que la humitat relativa ho ha fet del 29,4% al 72,7%. Per la seva banda, la insolació ha passat dels 21,52 $lumen \cdot m^{-2}$ als 9.635,01 $lumen \cdot m^{-2}$. Els màxims d'insolació i de temperatura ambiental coincideixen entre les 17:58 h i les 18:08 h. Els valors mínims, en el cas de la temperatura ambiental, es donen a l'inici i al final de l'experiment i, per a la insolació, a la sortida del Sol a les 7:25 h i a partir de les 20:35 h quan els penya-segats de s'Alavern, per l'angle de la llum del sol, romanen en penombra. El màxim d'humitat relativa s'hi registra a les 8:27 h. Entre les 13:30 h i les 14:00 h és quan hi ha els canvis més bruscs de totes les variables ambientals. Temperatura i insolació pugen al voltant de 4 ºC i 4270 $lumen \cdot m^{-2}$ i la humitat relativa baixa de l'ordre de dotze unitats a l'escala relativa. Entre les 19:00 h i

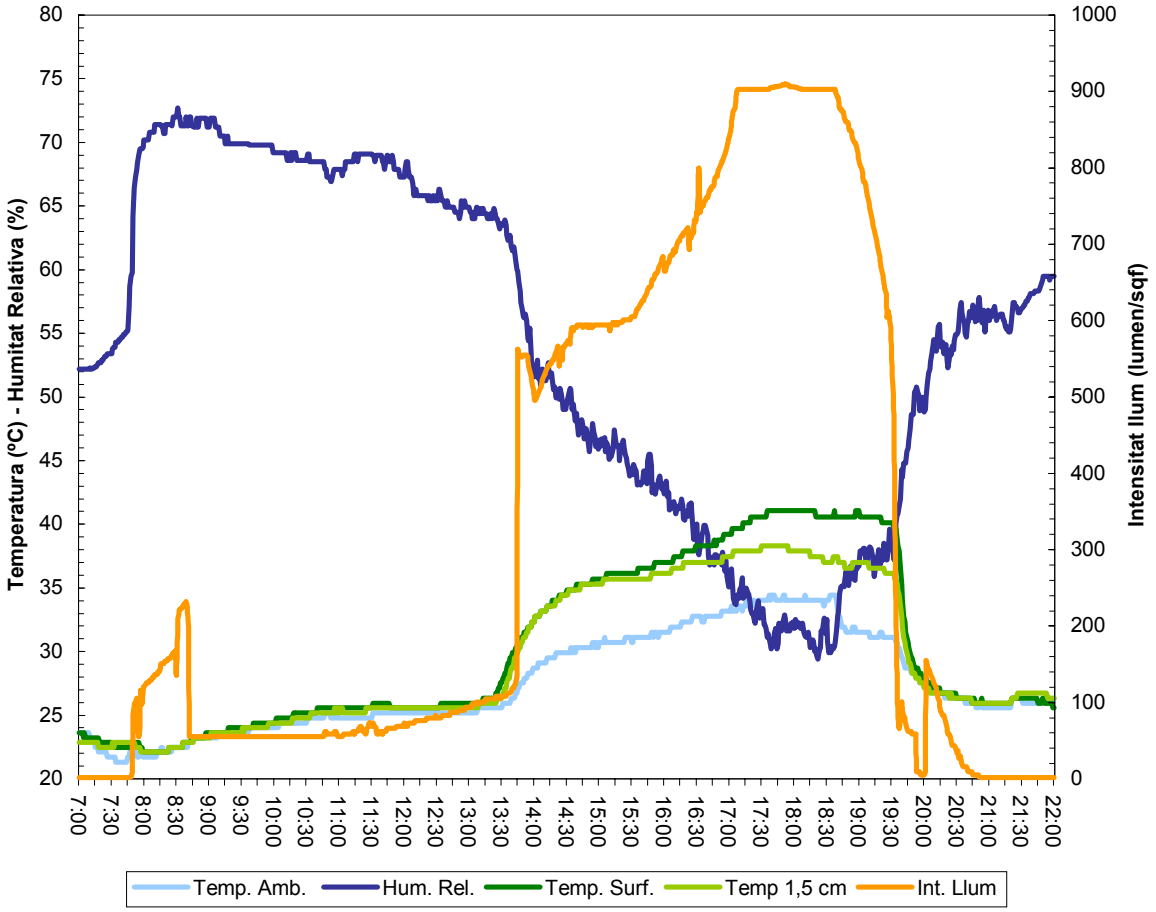


Fig. 2.13 Evolució dels paràmetres ambientals, de temperatura de la superfície de la roca i en profunditat durant l'experiment.

les 20:00 h, es tornen a donar els canvis bruscs de les variables ambientals, però aquesta vegada el sentit és invers. La temperatura baixa, de forma més gradual, dels 31 ºC als 27 ºC. La humitat també augmenta i, amb una pujada més intensa que no el descens del matí, passa del 37% al 49%. Tanmateix, el canvi més brusc és el de la insolació. En poc menys d'una hora passa de 9603 lumen·m^{-2} a 608 lumen·m^{-2}. De forma gràfica, es pot apreciar com la incidència de la llum sobre la plataforma, amb la façana del penya-segat exposada a ponent, en fa augmentar la temperatura i reduir la humitat i a la inversa (Fig. 2.13).

Pel que fa a les temperatures de la superfície de la roca i de les diferents profunditats, el sensor a 3 cm de la superfície no registrà correctament les dades. Això no obstant, les sèries de temperatura en superfície i a 1,5 cm, donen seqüències ben interessants. Fins a les 08:59 h la temperatura ambiental i la del rocam es força semblant. A partir d'aquesta fita, la superfície de la roca i els valors a 1,5 cm són lleugerament majors que la temperatura ambiental fins a les 13:30 h quan, arran de la incidència directa de la llum del sol sobre la plataforma, les temperatures comencen a pujar i s'hi s'observa un efecte d'acumulació d'energia calòrica fins a les 19:30 h, quan comença a disminuir. De les 15:30 h a les 19:30 h la temperatura en superfície és major que la temperatura a 1,5 cm. Així com deixa d'incidir la llum del sol sobre la plataforma i baixa la temperatura ambiental, també ho fa la temperatura de la superfície. Llavors, la sèrie de temperatures a 1,5 cm roman per sobre les altres atès que no està en fase amb l'alliberament d'energia de les anteriors. Tot plegat, posa de manifest l'existència d'un gradient tèrmic entre aire, superfície de la roca i la roca, amb canvis de signe durant el dia. Val a dir que les diferències arriben a ser considerables. A les 17:45 h tenim els màxims de temperatura a la superfície de la roca i a 1,5 cm d'aquesta, que són de 41 ºC i 38 ºC respectivament, gairebé 6 ºC i 4 ºC més que no la temperatura ambiental.

2.3.4.2 Comportament de la superfície rocosa

El registre dels 148 valors d'altura relativa, cada dues hores, de les 08:00 h a les 22:00 h, suposa un total de 2.072 valors d'altura relativa. S'han calculat els principals paràmetres estadístics descriptius tant per als paràmetres d'altura relativa, com per a les diferències d'altura relativa entre lectures successives (Taula 2.8).

Altures relatives	08:00 h	10:00 h	12:00 h	14:00 h	16:00 h	18:00 h	20:00 h	22:00 h
N	148	148	148	148	148	148	148	148
Mitjana aritmètica	4.250	4.257	4.2813	4.288	4.284	4.283	4.313	4.307
Límit inferior 95	3.963	3.970	3.9970	4.002	3.998	3.997	4.028	4.022
Límit superior 95	4.537	4.543	4.5656	4.574	4.570	4.570	4.599	4.593
Mitjana retallada 5%	4.233	4.242	4.2655	4.275	4.270	4.270	4.300	4.294
Mitjana	4.108	4.138	4.1675	4.184	4.179	4.184	4.214	4.185
Variància	2.991	2.983	2.937	2.964	2.972	2.974	2.963	2.962
Desviació típica	1.729	1.727	1.7136	1.721	1.723	1.724	1.721	1.721
Mínim	0.874	0.764	0.810	0.807	0.808	0.802	0.813	0.80
Màxim	8.342	8.365	8.420	8.406	8.458	8.411	8.428	8.45
Rang	7.468	7.601	7.61	7.599	7.650	7.609	7.615	7.65
1r quartil								
3r quartil								
Amplària interquartils	2.456	2.465	2.420	2.437	2.445	2.456	2.432	2.444

Dif. altures relatives	08:00 a 10:00 h	10:00 a 12:00 h	12:00 a 14:00 h	14:00 a 16:00 h	16.00 a 18:00 h	18:00 a 20:00 h	20:00 a 22:00 h
N	148	148	148	148	148	148	148
Mitjana aritmètica	0.0064	0.0241	0.0075	-0.0041	-0.0004	0.0299	-0.0062
Límit inferior 95	-0.0356	-0.0186	-0.0354	-0.0086	-0.0047	0.0241	-0.0116
Límit superior 95	0.0485	0.0670	0.4999	0.0003	0.0038	0.0356	-0.0007
Mitjana retallada 5%	-0.0130	0.0450	-0.1288	-0.0062	0.0017	0.0310	-0.0037
Mitjana	-0.0120	0.0440	-0.0110	-0.0060	0.0010	0.0230	-0.0020
Variància	0.0650	0.0670	0.0660	0.0010	0.0010	0.0010	0.0010
Desviació típica	0.2539	0.2581	0.2573	0.0269	0.0258	0.0347	0.0032
Mínim	-0.3030	-2.9680	-0.1010	-0.0690	-0.2220	-0.2500	-0.1470
Màxim	2.9820	0.3350	3.0350	0.1950	0.0740	0.1590	0.0740
Rang	3.2850	3.3030	3.1360	0.2640	0.2960	0.4090	0.0140
1r quartil							
3r quartil							
Amplària interquartils	0.0200	0.0510	0.0370	0.0200	0.0110	0.0430	0.0140

Taula 2.8 Resum estadístic per als valors d'altura relativa (superior) i de diferència d'altura relativa entre registres successius (inferior) de la superfície SA TMEM 2 de s'Alavern. Unitats en mm.

Per als dos conjunts de dades, les desviacions típiques són grans com també ho són els errors associats a les mitjanes. Així doncs, la nostra matriu de dades no té una distribució normal i és aconsellable emprar, per a la seva anàlisi, tècniques d'estadística no paramètrica.

És interessant comparar els resultats dels estadístics descriptius de les altures relatives amb el de les diferències entre altures relatives o, dit d'una altra manera, les taxes d'erosió–acreció horàries. Les diferències entre els límits o topalls superior i inferior de la mitjana aritmètica són, si més no, negligibles (Taula 2.8 superior). Hi ha variacions, però en el segon o en el tercer decimal. Els límits superior i inferior de la mitjana aritmètica delimiten el rang de valors per als quals existeix la probabilitat del 95% d'incloure el valor de mitjana aritmètica d'una població. En canvi, per a les dades de diferència d'altura relativa entre registres successius, la diferència entre els topalls superiors i els inferiors – fins i tot canviant de signe d'una lectura a una altra i a cada un dels membres– indica que, a primer cop d'ull i de forma exploratòria, hi ha variacions en la microtopografia entre registres (Taula 2.8 inferior).

De fet, les poblacions susceptibles d'acollir la mitjana aritmètica de les diferències d'altura relativa, com a mínim en tres ocasions, tenen els límits del topall per sobre o per sota zero. La resta de cops tenen un membre a cada signe.

El test d'anàlisi de la variància per classes i de dues cues de Friedman (Matthews, 1981) es pot utilitzar per avaluar si existeixen canvis significatius en la topografia durant el mostratge. Aquest test permet treballar amb observacions o parells d'observacions que no són independents. Certament, l'altura relativa d'una coordenada no és independent del valor del registre previ. Però, el problema potencial, en l'ús d'aquesta tècnica estadística, apareix quan es planteja el dubte de la independència entre les diferents coordenades, perquè podria existir-hi la possibilitat d'una autocorrelació espacial. Viles (2001) remarca que la consideració de l'escala és un factor clau en els estudis de meteorització, tot i que, de vegades, resulta problemàtic establir lligams entre formes a nanoescala i els processos que operen en altres escales més grans (Moses i Viles, 1996). Si la resolució vertical del TMEM és de 0,002 mm, i cada coordenada està

	08 a 10 h	10 a 12 h	12 a 14 h	14 a 16 h	16 a 18 h	18 a 20 h	20 a 22 h
08 a 10 h	/						
10 a 12 h	-8.677 *0.000*	/					
12 a 14 h	-0.142 *0.087*	-8.981 *0.000*	/				
14 a 16 h	-3.756 *0.000*	-8.678 *0.000*	-2.390 *0.017*	/			
16 a 18 h	-5.892 *0.000*	-8.222 *0.000*	-4.841 *0.000*	-3.819 *0.000*	/		
18 a 20 h	-8.919 *0.000*	-8.593 *0.000*	-8.274 *0.000*	-8.574 *0.000*	-8.229 *0.000*	/	
20 a 22 h	-3.300 *0.001*	-8.566 *0.000*	-2.352 *0.019*	-0.892 *0.372*	-2.261 *0.024*	-8.618 *0.000*	/

Taula 2.9 Paràmetres del test estadístic de Wilcoxon. Valors crítics i de probabilitats (en cursiva) per a cada parell de diferències d'altura relativa entre registres.

separada com a mínim per segments lineals de 10 mm, llavors allò que comparam són micres respecte centímetres. Aquest fet implica que, la resolució vertical és, com a mínim, cinc vegades més gran que l'horitzontal. Per aquest motiu, ja que estam treballant en escala de micres, considerarem que els punts, en el pla horitzontal, són independents els uns dels altres.

La hipòtesi nul·la del test de Friedman és que no hi ha variacions significatives de microtopografia; és a dir, que les posicions ordinals de les observacions no difereixen entre registres. Els estadístics (χ^2_r = 366,918; gl = 7; p = 0,000) permeten concloure amb solidesa que a la superfície estudiada hi ha diferències significatives entre els registres de microtopografia.

El test no-paramètric de Wilcoxon (Matthews, 1982) permet avaluar si els canvis en la superfície de la roca són homogenis en tota la superfície o bé s'hi donen de forma puntual. Dit d'una altra manera, si és tota la superfície que es desplaça en un sentit, o bé si ho fa per pegats. La taula 2.9 recull els paràmetres i probabilitats resultants d'aquest test. Per a tots els parells podem rebutjar, amb solidesa, la hipòtesi nul·la del test que estableix que les diferències d'altura relativa entre registres és homogènia. Tot plegat, posa de manifest que la superfície de la roca estudiada no es mou com un cos homogeni, sinó que els canvis de cota són heterogenis arreu de la superfície.

2.3.4.3 Tendències de la superfície rocosa

S'ha dissenyat un algoritme que classifica les diferències d'altura relativa en tres categories: ascens, descens i sense moviment (estable), respecte del registre previ. Atès que l'error instrumental i els assaigs per determinar la distorsió de l'erosió de l'agulla del TMEM, sumats oscil·len d'un mínim de 0,002 mm a un màxim de 0,007 mm, el paràmetre de tall de l'algoritme s'ha ubicat en ± 0,010 mm. Així, aquells valors de diferència d'altura relativa compresos entre 0,010 mm i –0,010 mm es consideraran com estables. Aquells amb una taxa de canvi superior a 0,010 mm seran punts ascendents i els superiors a –0,010 mm seran descendents.

Els resultats de l'aplicació de l'algoritme es presenten a la Fig. 2.14. Així doncs, s'esbossa l'existència d'un cicle, pel que fa a la distribució dels punts i la seva tendència durant el mostratge. La majoria dels punts, entre un 26% i un 68%, romanen estables durant el dia, especialment entre les 12:00 h i les 18:00 h. Les primeres hores del mostratge, i en particular a partir de les 12:00 h, una bona part de les coordenades (entre un 37% i un 54%) experimenten un descens respecte dels registres previs. Finalment, tant a primera hora del matí, com a darrera de l'horabaixa, una part considerable de les coordenades (>50 %) descriuen tendències d'ascens respecte de les posicions d'altura relativa anteriors. Podem definir un escenari, doncs, en el qual la superfície es contreu durant el matí-migdia i s'espandeix durant l'horabaixa-vespre. Observi's que durant el migdia i les primeres hores de l'horabaixa, hi ha un augment del nombre de punts estables. Després de cada descens, augmenta la proporció de punts estables, com si es tractàs d'un efecte acumulatiu.

Per avaluar si la tendència observada és estadísticament significativa s'ha utilitzat el test de la χ^2. L'operativa d'aquest estadístic consisteix a comparar una distribució on en cada interval hi hauria d'haver una part proporcional de punts de cada una de les classes descrites, respecte de la distribució real. Per tant, la hipòtesi nul·la del test és que, si les distribucions són proporcionals, llavors es pot afirmar que no hi ha diferències entre el nombre d'ascens, descens i estabilitat de punts durant el mostratge. Aquesta hipòtesi s'ha rebutjat amb una probabilitat major del 99 % (χ^2 = 520,87; gl = 12; p = 0,000). Aleshores, hi ha una diferència significativa entre els punts que pugen, baixen o romanen quiets entre els diferents registres. Aquestes diferències s'accentuen entre les primeres hores i les darreres del mostratge.

És interessant avaluar quin és el comportament del punt (coordenada) i els seus valors d'altura relativa d'un registre a un altre. La taula 2.10 recull quina

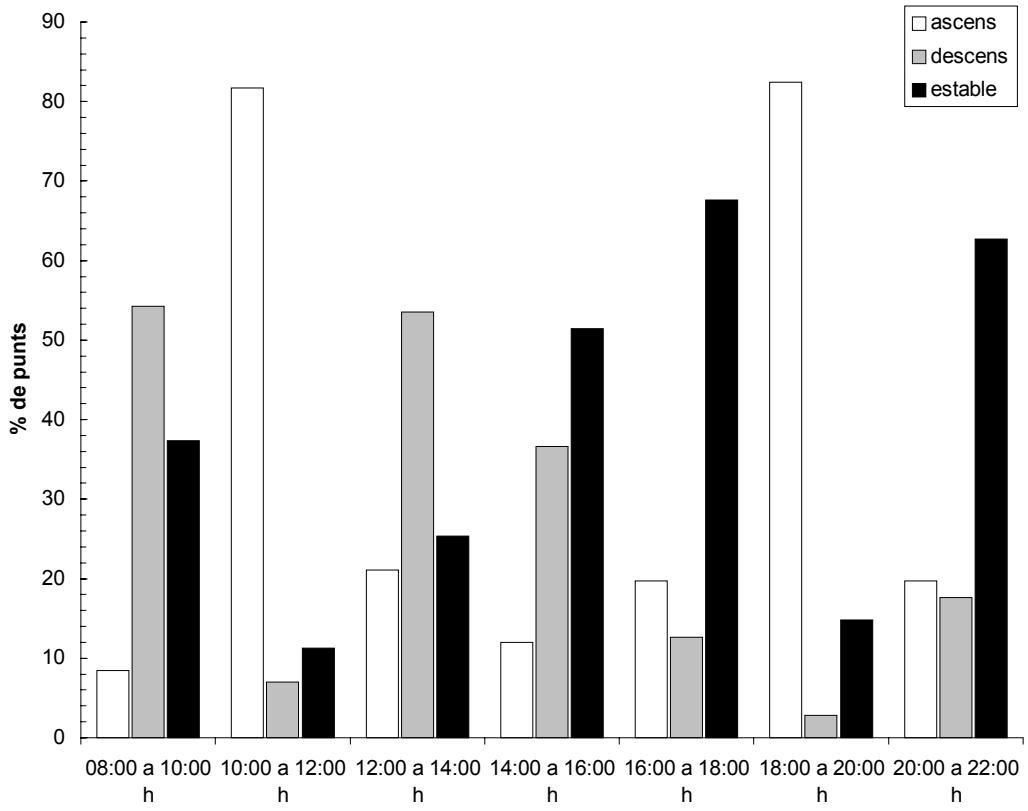


Fig. 2.14 Tendència de la superfície SA TMEM 2 entre registres de mesura d'altura relativa amb el TMEM.

n'és la tendència. Com a mínim 331 coordenades de la superfície mostrejada, un 38,85%, durant part del dia, han experimentat períodes d'estabilitat. Una part important de la superfície, 336 punts que suposen el el 39,44% dels regsitres de tot el mostratge, han augmentat la seva posició relativa respecte del registre previ i només un 21,71% dels casos, 185 punts, han seguit la tendència inversa. Val a dir que allò més freqüent és que després d'un període d'estabilitat el punt ascendeixi i viceversa (17,72% dels casos), i que després d'un ascens el punt romangui estable (15,85% dels casos). Amb ordres de magnitud semblants, propers al 14%, hi tenim les tendències de pas d'estable a estable, d'increment relatiu a baixada relativa i de descens a ascens.

Un dels altres interrogants que s'hi plantegen és si les tendències d'una categoria a l'altra es distribueixen de forma homogènia durant el dia o bé estan concentrades en determinats intervals horaris. Per

	08 a 10 10 a 12	**10 a 12 12 a 14**	**12 a 14 14 a 16**	**14 a 16 16 a 18**	**16 a 18 18 a 20**	**18 a 20 20 a 22**	**N**	**%**
Descens a descens	7	4	27	4	0	0	42	*4,93*
Descens a estable	9	1	40	27	0	3	80	*9,39*
Descens a ascens	61	5	9	21	18	1	115	*13,50*
Estable a descens	2	5	11	4	3	3	28	*3,29*
Estable a estable	5	5	20	62	10	14	116	*13,62*
Estable a ascens	46	6	5	7	83	4	151	*17,72*
Ascens a descens	1	67	14	10	1	22	115	*13,50*
Ascens a estable	2	30	13	7	11	72	135	*15,85*
Ascens a ascens	9	19	3	0	16	23	70	*8,22*
Sumatoris								
Vector estable	16	36	73	96	21	89	331	*38,85*
Vector ascendent	116	30	17	28	117	28	336	*39,44*
Vector descendent	10	76	52	18	4	25	185	*21,71*

Taula 2.10 Tipus de tendència, i nombre de coordenades que l'experimenten, en el desplaçament relatiu dels punts de la superfície rocosa SA TMEM 2.

	0 h	2 h	4 h	6 h	8 h	10 h	12 h	14 h
Ascens	0	14	74	35	14	5	0	0
Descens	16	34	58	24	10	0	0	0
Estable	5	22	37	40	25	10	3	0

Taula 2.11 Temps operatiu dels moviments relatius de la superfície rocosa a SA TMEM 2.

resoldre aquesta qüestió utilitzarem, de nou, el principi operatiu i la capacitat d'anàlisi del test χ^2. Ara, la hipòtesi nul·la és que no hi ha diferències en la tendència de moviment dels punts entre els successius registres. Una vegada més, la hipòtesi nul·la és rebutjada a nivells superiors al 99 % de probabilitats (χ^2 = 434,9; gl = 10; p = 0.000). Aquest fet implica que les diferències són molt marcades durant el dia i que existeix cert biaix en la concentració dels canvis de tipus de moviment relatiu d'una categoria a l'altra.

Un altre dels punts a considerar és quant temps opera cada un dels moviments sobre la superfície i quina n'és la seva durada. La taula 2.11 recull els resultats de considerar l'operació de les tendències a la superfície. No hi ha cap punt que no experimenti un episodi d'ascens, així com també no hi ha cap punt que hagi romàs estable durant tot el mostratge. De la mateixa manera, hi ha cinc punts que mai no han passat per un cicle d'estabilitat i setze sobre els quals no han actuat moviments descendents. No obstant això, almenys, hi ha entre trenta-cinc i quaranta punts que han tengut un període d'estabilitat, com a mínim, de vuit hores. Quasi bé la totalitat de punts han seguit tendències ascendents o descendents entre dues i quatre hores.

En la majoria dels casos, la durada dels moviments ascendents, descendents i l'absència d'aquests ha durat consecutivament dues hores. Períodes de tendència més llargs són relativament anecdòtics, excepte per als punts amb cicles d'estabilitat que poden arribar a durar entre vuit i deu hores, tot i que el més habitual són episodis d'estabilitat de quatre i sis hores consecutives (Fig. 2.15).

2.3.4.4 Discussió

De l'anàlisi estadística, en coneixem que durant el mostratge, i com a mínim en intervals de dues hores, la microtopografia experimenta variacions significatives d'altura relativa. Aquestes variacions no tenen una distribució espacial homogènia a la superfície rocosa.

Les fluctuacions d'altura relativa permeten dividir els desplaçaments en ascensos i descensos respecte de la posició prèvia. De la mateixa manera, l'estabilitat dels punts, el fet que no canviïn d'altura relativa durant l'interval, es considera com una variable categòrica més.

Durant el dia, tot coincidint amb l'increment de temperatura ambiental i amb el descens d'humitat relativa, la superfície de la roca experimenta variacions en la seva microtopografia. Però, és precisament d'ençà de les 13:00 h, amb la incidència de la llum del sol sobre la plataforma, quan

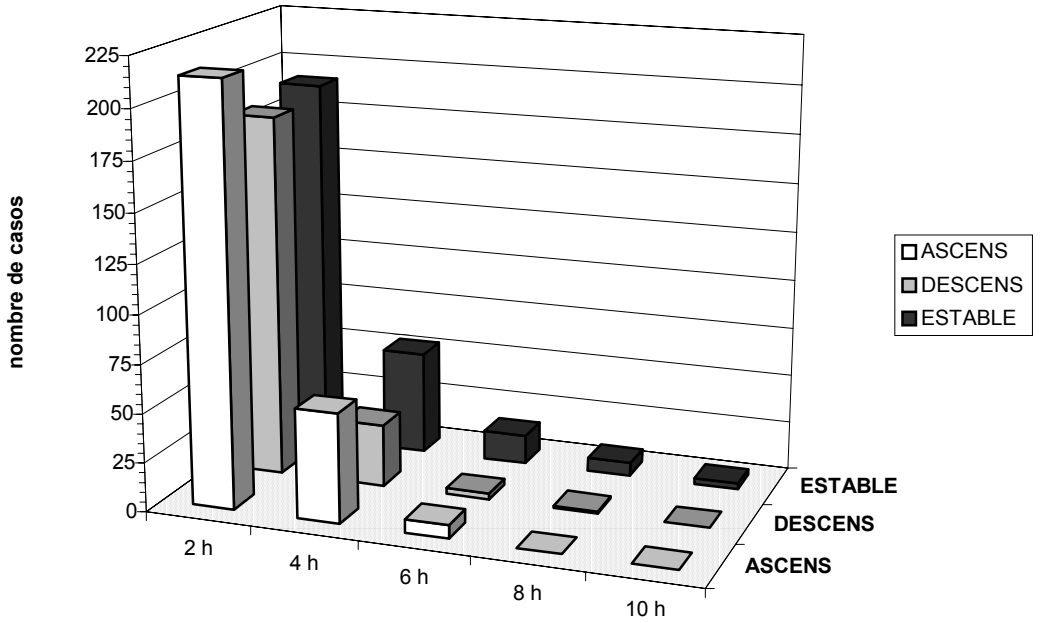


Fig. 2.15 Durada dels moviments relatius entre els intervals de registre de la superfície SA TMEM 2.

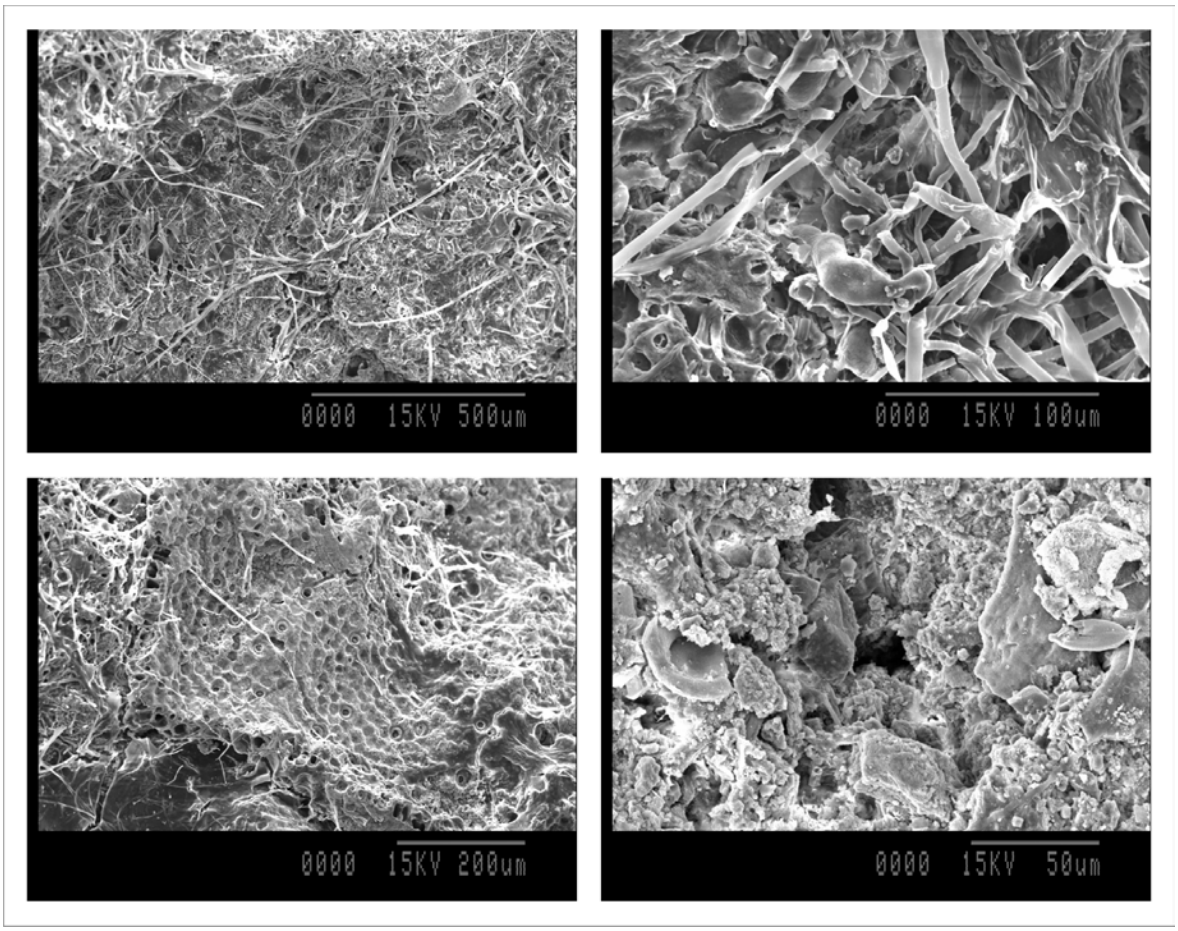


Fig. 2.16 Imatges de microscopi electrònic de rastreig (SEM) de la superfície rocosa SA TMEM 2 on s'hi pot apreciar la important presència de la pàtina biològica i com les hifes i el tal·lus liquènic entapissen la superfície, s'entrellacen amb els grans de la roca i en penetren els buits.

augmenten els punts que experimenten un descens i augmenta el pes de les coordenades que s'estabilitzen així com avança el dia. L'horabaixa, quan deixa d'incidir la llum del sol sobre el rocam, disminueix la temperatura ambiental i augmenta la humitat relativa. Llavors, s'hi incrementa el nombre de punts que pateixen episodis d'ascens.

Aquests patrons de canvi de la superfície rocosa estudiada són força interessants en relació als estudis previs de meteorització del rocam litoral. El patró que s'ha caracteritzat, en aquest experiment de resolució temporal horària, és contrari al comportament que s'espera de la superfície de la roca sota la influència de l'expansió i contracció tèrmiques. Sota el guiatge d'aquest procés, la superfície de la roca s'hauria d'expandir durant les hores de màxima insolació (Bland i Rolls, 1998; Hall i Hall, 1991; Winkler, 1997). Altres processos que segueixen una tendència similar a la contracció i expansió tèrmica, són el creixement dels cristalls de sals (Goudie i Viles, 1997) o la disminució o desplaçament del contingut d'aigua de la roca (Cooke, 1994). Així doncs, no ens trobam davant un cicle que pugui ser explicat pels processos anteriors. Per aquest motiu, s'han analitzat diverses mostres de fragments de roca propers a la superfície caracteritzada, mitjançant lupa binocular, SEM i làmina prima.

Les observacions amb lupa binocular i microscopi electrònic posen de manifest que la superfície de la roca té una important cobertura biològica (Fig. 2.16). Amb la lupa binocular, s'hi ha identificat la presència del líquen *Arthopyrenia halodytes* (Lluís Fiol, *com. pers.*), així com cianobacteris i hifes de fongs indeterminats. Les hifes apareixen arreu de la superfície, ocupant els buits i les microfractures, fins a pocs mil·límetres per sota de la superfície.

Els líquens són capaços d'alterar el substrat rocós per processos físics i bioquímics. Les rizines penetren en els porus de la roca, pressionant i fragmentant la superfície de la roca per l'expansió i la contracció del seu tal·lus (Fry, 1927; Cooks i Otto, 1980). L'atac bioquímic pot estar relacionat bé amb la producció de diòxid de carboni arran de la respiració, o bé amb la secreció d'àcids orgànics que reaccionen amb el substrat rocós (Chen *et al.*, 2000; Gehrman *et al.*, 1992; Jones i Khale, 1985; Pomar *et al.*, 1975; Stretch i Viles, 2002). Molts estudis que aborden aquesta

matèria es desenvolupen des d'una perspectiva descriptiva, o bé inferint les relacions entre el líquen i l'evolució de les microformes. Són pocs els treballs que, com el de Moses i Smith (1993), relacionen l'erosió del rocam amb l'activitat biofísica del líquen.

Els experiments a propòsit de la fisiologia del líquen constaten que aquests organismes poden patir cicles d'humectació i dessecació amb freqüència (Barreno, 1997; Llimona, 1991). Durant el dia el tal·lus liquènic s'asseca i pot arribar a perdre el 80% del seu pes sec, tot romanent inactiu fins a l'horabaixa quan tornen a hidratar-se amb l'increment d'humitat ambiental (Lange, 1992). Just després de la sortida del Sol, els líquens reben el màxim d'hidratació arran de la condensació de la rosada. És, també, a primera hora del matí quan l'acció fotosintètica del líquen arriba al seu màxim i disminueix dràsticament, així com augmenta la temperatura i la intensitat de la llum. La combinació dels cicles d'humitat i de llum s'han identificat com els factors causants dels canvis importants de l'anatomia del tal·lus i les dimensions de les hifes, perquè el seu contingut en aigua, sols en un dia, pot canviar al voltant d'un 50% o 60% (Souza-Egipsy *et al*., 2000; Larson, 1987).

Mitjançant les imatges de microscopi electrònic de rastreig (SEM), s'ha mesurat el diàmetre de les hifes que apareixen en els primers mil·límetres de la superfície de la roca i la seva amplària varia de 7,14 a 10,71 µm. Per tant, canvis en el contingut d'aigua poden fer-les augmentar o disminuir entre 4,28 o 6,4 µm. Aquest ordre de magnitud ens ubica en un escenari on l'amplària de les hifes pot oscil·lar de 0,005 a 0,010 mm o de 0,008 a 0,014 mm. Aquests valors són del mateix ordre de magnitud que els valors de mitjana aritmètica de diferència d'altura relativa que s'han registrat instrumentalment a l'experiment (Taula 2.8 inferior). Per tant, el patró de canvis en la microtopografia de la superfície rocosa a s'Alavern sembla seguir l'expansió i la contracció del biofilm que entapissa la roca.

Així doncs, canvis en la temperatura al voltant de 5 ºC, del 40% de la humitat relativa i propers a les 1000 unitats de flux lluminós, són suficients per justificar fluctuacions de la superfície rocosa i desplaçaments extrems de –0,303 mm a 0,335 mm, un cop descartats aquells punts que es corresponen amb l'error associat a l'impacte de l'agulla del TMEM.

La repetició d'aquests cicles diaris explica el perquè de la posició variant de punts respecte dels registres previs i indueix a considerar la superfície de la roca, no com un cos inert, sinó com quelcom força dinàmic. Com a mecanisme d'alteració, les variacions de microtopografia debiliten la roca lentament i en condicionen el desmanegament granular, fet que casaria amb les baixes taxes que s'han obtingut a l'experiment d'abast temporal llarg.

2.4
Patrons i taxes d'erosió a costes rocoses calculades mitjançant TMEM: Marengo (Victòria, Austràlia)

S'han desenvolupat dos experiments per tal d'avaluar els patrons i les taxes d'erosió a les costes rocoses mitjançant l'ús del micròmetre de dial mòbil. El primer dels experiments consisteix a determinar la taxa d'erosió en un interval temporal llarg, d'un any. El segon experiment escurça el marc temporal a un seguiment horari durant un cicle de vint-i-quatre hores.

2.4.1
Àrea d'estudi

La badia de Marengo es localitza a la costa sud occidental de Victòria (Austràlia), a 185 km al SE de Melbourne (Fig. 2.17), tot coincidint amb el contacte de les serralades d'Otway amb la mar. El relleu es caracteritza per una topografia accidentada desenvolupada sobre arenisques i argil·lites del Cretaci Inferior (Tickell *et al*., 1992).

La morfologia de la costa respon a un marcat control estructural, caps i badies se succeeixen d'acord amb el capbussament dels estrats i de la fracturació. De fet, la linealitat dominant en aquest sector de costa està relacionada amb la presència d'una falla mar endins (Jenkin, 1991). Les plataformes litorals són formes amb una presència abassegadora que sols veuen trencada la seva continuïtat per les platges i pels caps de les badies. La litologia és d'una importància fonamental per explicar les formes del relleu d'aquest sector costaner (Gill, 1973): allà on afloren les argil·lites ens trobam amb les planes litorals, els sistemes albuferencs i els sistemes dunars associats; mentre que, quan afloren les arenisques, penya-segats i plataformes en són els elements característics.

No es disposa de valors d'altura d'ona per a l'àrea, però es tracta d'una costa sotmesa a un mar de fons molt energètic, amb un clima marítim amb nombroses situacions de tempesta procedents de l'Oceà Índic (Gill i Lang, 1983). La badia de Marengo està subjecta a un règim micro i mesomareal, amb una amplitud de marea de 1,05 m. Les plataformes litorals romanen bona part del temps emergides, i sols durant les pleamars màximes són batudes per les ones (Bird, 1993b).

La precipitació anual és de 1.000 mm i les temperatures mitjanes màximes oscil·len entre els 21,9 ºC el mes de gener i els 12,1 ºC el mes de juliol. Pel que fa a les mínimes, són de 14,6 ºC el mes de febrer i de 7,3 ºC el mes de juliol. No obstant això, durant l'estiu es poden arribar a registrar temperatures diürnes superiors als 40 ºC.

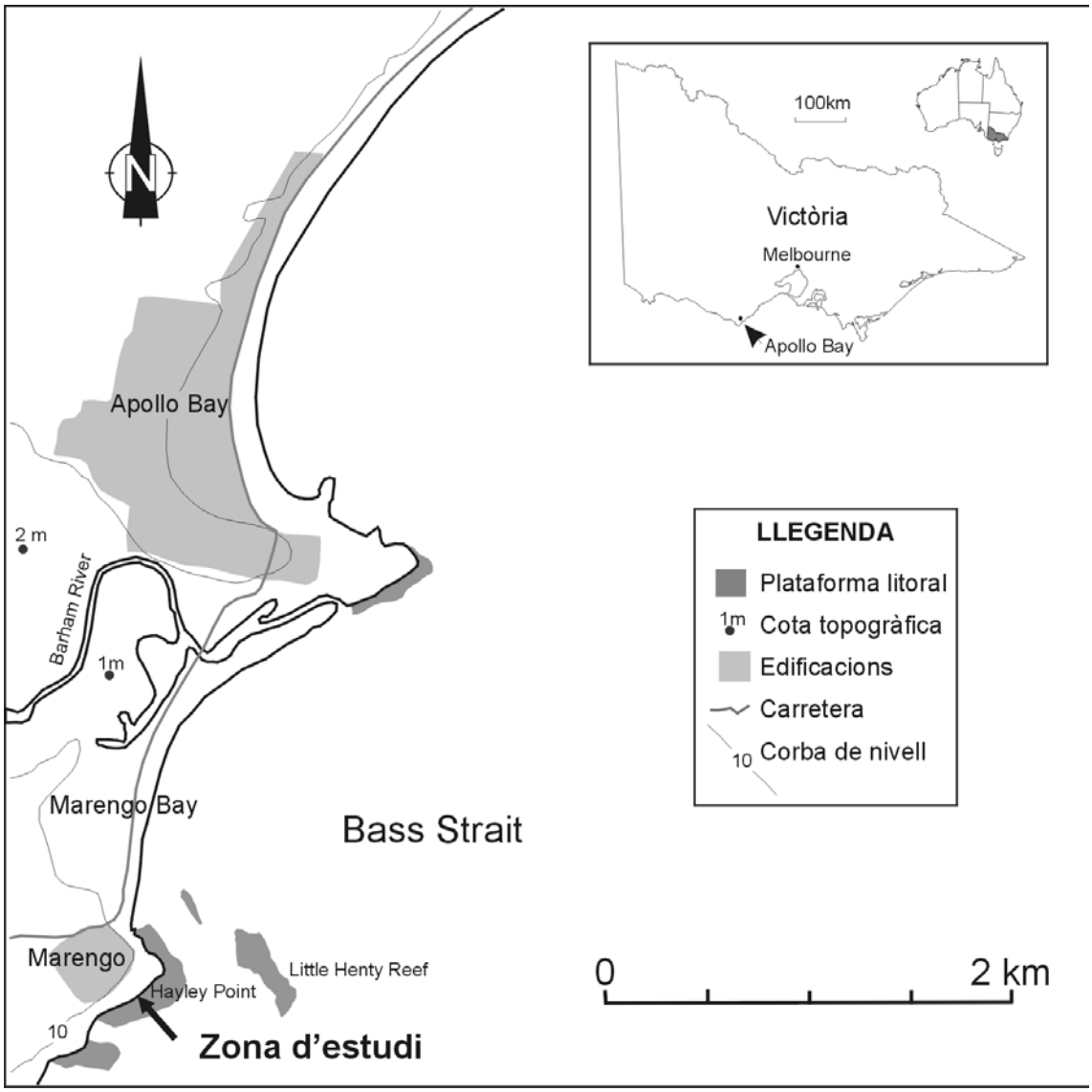


Fig. 2.16 Localització de la zona d'estudi a Hayley Point, badia de Marengo (Victòria, Austràlia).

L'àrea d'estudi es localitza a 100 m en direcció oest de Hayley Point (Marengo). Es caracteritza per la presència d'una plataforma subhoritzontal –tipus B– de 30 m d'amplària modelada sobre arenisques arcòsiques de color verd-grisós (Fig. 2.18). El límit marí de la plataforma acaba amb un salt brusc, de poc més d'1,5 m d'alçària, a partir del qual es perllonga una plataforma permanentment sotaiguada –sols visible a les baixamars màximes– altres 30 m mar enllà. Els sectors més propers al límit marí de la plataforma destaquen per la intensitat de la colonització biològica. Entre d'altres organismes, en destaquen pegellides (*Patelloida latistrigata*, *Patellodia alticostata*, *Cellana tramoserica*), bivalves (*Mytilus planulatus, Donax deltoides*) i gastròpodes (*Bembicum namum, Noddilittorina unifascata, Austrocochlea constricta, Tubo undulatus*), així com també macroalgues del grup de les fucals. El límit terrestre de la plataforma el marca un penya-segat de 3,5 m d'alçària de perfil esglaonat. Taffoni, nius d'abella i concrecions són elements molt característics de l'aparença geomòrfica de la façana del penya-segat.

2.4.2
Materials i disseny experimental

La superfície rocosa estudiada es troba a 1,83 m sobre el nivell mitjà del mar, a 30 m del límit marí de la plataforma litoral (Fig. 2.18). El rocam que hi aflora el formen arenisques d'origen volcànic (arenites arcòsiques de color gris i verdós) de la formació Eumeralla. Aquesta formació es correspon al membre superior del Grup Mesozoic d'Otway i la componen seqüències monòtones de sediment corresponents a un ambient fluvial força energètic (Struckmeyer i Felton, 1990), amb tota probabilitat un curs trenat (*braided*) amb una font abundant d'arenes i fragments volcànics (Drossos, 1989). La composició dels detritus

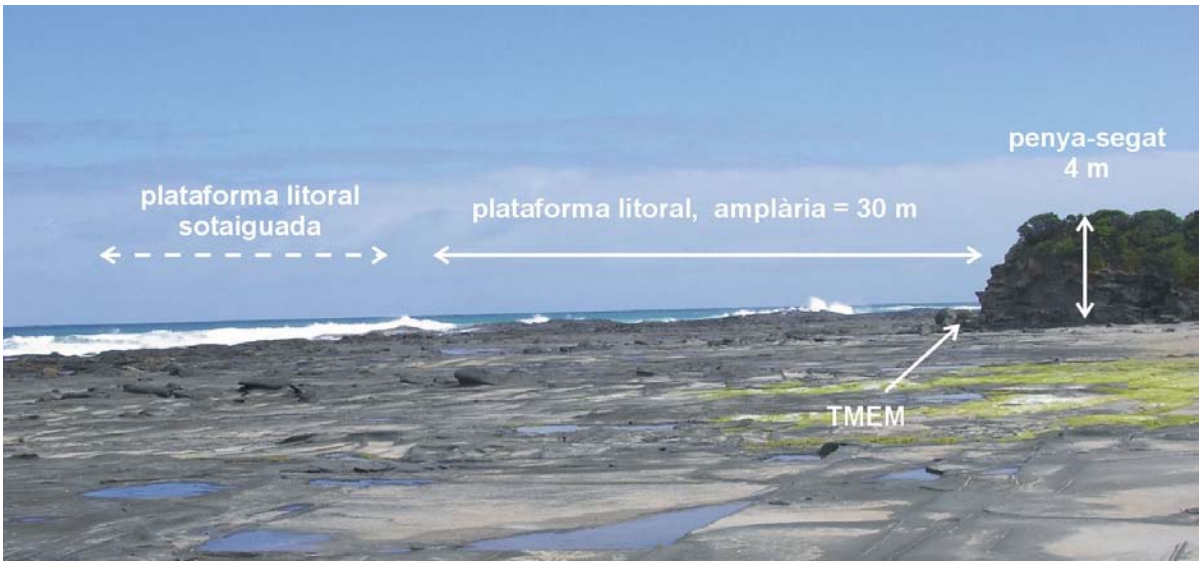


Fig. 2.18 Penya-segat i plataforma litoral llavorada en arenites arcòsiques a Marengo (Victòria, Austràlia)

volcànics és principalment feldspàtica, tot i que modificada per un metamorfisme de baixa intensitat i pel ciment diagenètic de clorita.

L'estudi de les làmines primes mostra com el substrat està format per arenisques de gra fi, ben classificades (calibre de 4 a 2 phi). La forma dels grans és subangular i subarrodonida, el grau de cimentació és important i la porositat molt baixa (10,59 ± 1,17%). El principals components de la roca són fragments volcànics (originalment plagiòclasi –anortita– de formes subarrodonides) i fragments de quars de forma subangular. En una menor proporció, hi són presents amfíbols, piroxens, moscovita, goethita, així com clorita i altres minerals del grup de les argiles. La major part de les plagiòclasis presenten diferents graus de meteorització degudes, probablement, a la seva variació composicional que es tradueix en una alteració diversa. Les mostres més alterades presenten un increment de més del 50% dels grans d'anortita (plagiòclasi càlcica).

Per a la quantificació de les taxes d'erosió de la costa rocosa s'ha utilitzat el TMEM del Grup de Geomorfologia Litoral de la Universitat de Melbourne. Es tracta d'un TMEM modificat d'acord amb Stephenson (1997), mitjançant la incorporació d'un rellotge comparador digital, Mitutoyo® ID-C1025, i un programari de transmissió de dades que permet el registre automàtic de les lectures a un ordinador portàtil. S'han instal·lat els claus de relocalització de l'aparell en una superfície supralitoral, al peu del penya-segat. El TMEM abasta una superfície de 40 cm^2 i permet el registre de 188 valors d'altura relativa. A fi i efect d'avaluar l'error de registre de l'instrument, i la possible component d'erosió atribuïble al contacte físic de l'agulla del TMEM, s'han repetit un mínim de deu vegades les lectures d'altura relativa en diferents coordenades sobre un bloc de calibratge de la mateixa litologia i característiques del rocam sobre el qual es desenvolupa l'experiment al camp. L'error de registre de l'instrument s'ha quantificat en ± 0,003 mm (Taula 2.12).

El seguiment de les superfícies rocoses, mitjançant el TMEM a Marengo, s'ha dut a terme en dues ocasions: el 31 d'octubre de 2002 i el 13 de novembre de 2003. La darrera data també es correspon amb la realització de l'experiment de seguiment horari.

Per al càlcul de les taxes d'erosió s'han utilitzat dos procediments. D'una banda, el còmput de la diferència mitjana d'alçària relativa a partir dels valors dels mostratges corresponents a l'any 2002 i 2003; i, d'altra banda, el càlcul de la diferència de volum entre les superfícies –microtopografies– que, mitjançant el programari Surfer® v.7, s'han construït a partir de les coordenades i els valors d'alçària relativa per a cada un dels mostratges. Per convertir els valors de volum en valors lineals, amb la finalitat de comparar les taxes d'erosió entre ambdós procediments, s'ha dividit la diferència de volum entre superfícies per l'àrea de mostratge.

S'han recollit mostres de roca properes a la superfície estudiada per a la seva exploració mitjançant microscopi electrònic de rastreig, làmina prima i difracció de raigs X.

2.4.3
Taxes d'erosió anuals a la costa de Marengo

La superfície estudiada a Hayley Point, Marengo, suposa un conjunt de 376 registres d'alçària relativa i

Coordenada	L1	L2	L3	L4	L5	L6	L7	μ	σ
A6 - B8 - C11	11,697	11,695	11,690	11,696	11,696	11,694	11,694	11,695	*0,002*
A7 - B8 - C10	11,654	11,658	11,653	11,660	11,658	11,658	11,656	11,657	*0,002*
A8 - B8 - C9	11,693	11,695	11,691	11,697	11,696	11,694	11,693	11,694	*0,002*
A9 - B8 - C8	11,777	11,779	11,774	11,780	11,781	11,778	11,779	11,778	*0,002*
A10 - B8 - C7	11,848	11,843	11,839	11,845	11,846	11,843	11,844	11,844	*0,003*
A11 - B8 - C6	11,933	11,939	11,935	11,941	11,941	11,940	11,942	11,939	*0,003*
A6 - B7 - C11	11,692	11,694	11,690	11,696	11,695	11,693	11,693	11,693	*0,002*
A7 - B7 - C10	11,661	11,663	11,660	11,665	11,664	11,662	11,663	11,663	*0,003*
A8 - B7 - C9	11,687	11,690	11,687	11,692	11,691	11,689	11,689	11,689	*0,002*
A9 - B7 - C8	11,770	11,774	11,770	11,776	11,773	11,773	11,774	11,773	*0,002*
A10 - B7 - C7	11,839	11,840	11,837	11,843	11,843	11,840	11,839	11,840	*0,002*
A11 - B7 - C6	11,936	11,939	11,933	11,940	11,941	11,939	11,940	11,938	*0,003*
A6 - B9 - C9	11,698	11,705	11,696	11,707	11,706	11,704	11,705	11,703	*0,004*
A7 - B9 - C8	11,719	11,723	11,718	11,725	11,725	11,721	11,722	11,722	*0,003*
A8 - B9 - C7	11,800	11,804	11,800	11,800	11,804	11,802	11,802	11,802	*0,002*
A9 - B9 - C6	11,857	11,861	11,856	11,862	11,861	11,860	11,859	11,859	*0,002*
								Error instrumental mitjà	***± 0,003***

Taula 2.12 Registre d'altures relatives (mm) de l'experiment per avaluar l'error intrumental en la repetició de mesures del TMEM de la Universitat de Melbourne.

388 valors de taxes d'erosió (Annex 1). La diferència entre les microtopografies dels mostratges del 31.10.02 i el 13.11.03 aboca un domini clar de les coordenades amb tendències negatives. El 67% de les coordenades registren taxes d'erosió entre –0,050 mm i –0,150 mm per a l'interval de mesura. Sols un 5% de les coordenades presenten desplaçaments ascendents (Fig. 2.19).

La taxa d'erosió mitjana de la superfície estudiada, calculada a partir de les diferències de registre per a l'interval definit (Taula 2.13), és de –0,077 mm·a^{-1}. La desviació típica de la sèrie de valors de diferència de cota entre registres és més gran que la pròpia mitjana, la qual cosa, una vegada més, alerta de l'heterogeneïtat de respostes de la superfície rocosa.

De fet, per a la superfície supralitoral de la plataforma de Hayley Point, el rang de les taxes d'erosió oscil·la de –0,510 mm·a^{-1} a 0,378 mm·a^{-1}. A la figura 2.20 es fa palesa la tendència erosiva de la superfície rocosa, però també s'hi observa que no hi ha una tendència clara en la distribució de les coordenades amb taxes de signe positiu o de signe negatiu.

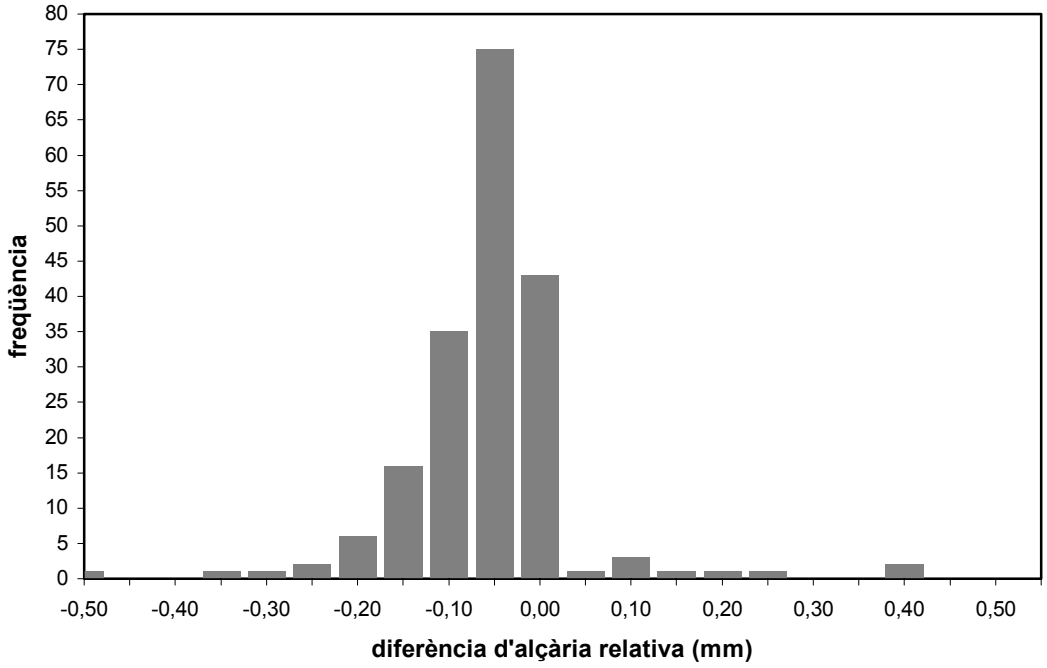


Fig. 2.19 Distribució de freqüències dels valors de diferència d'atura relativa (mm) entre el 31.10.02 i el 13.11.03 a Marengo.

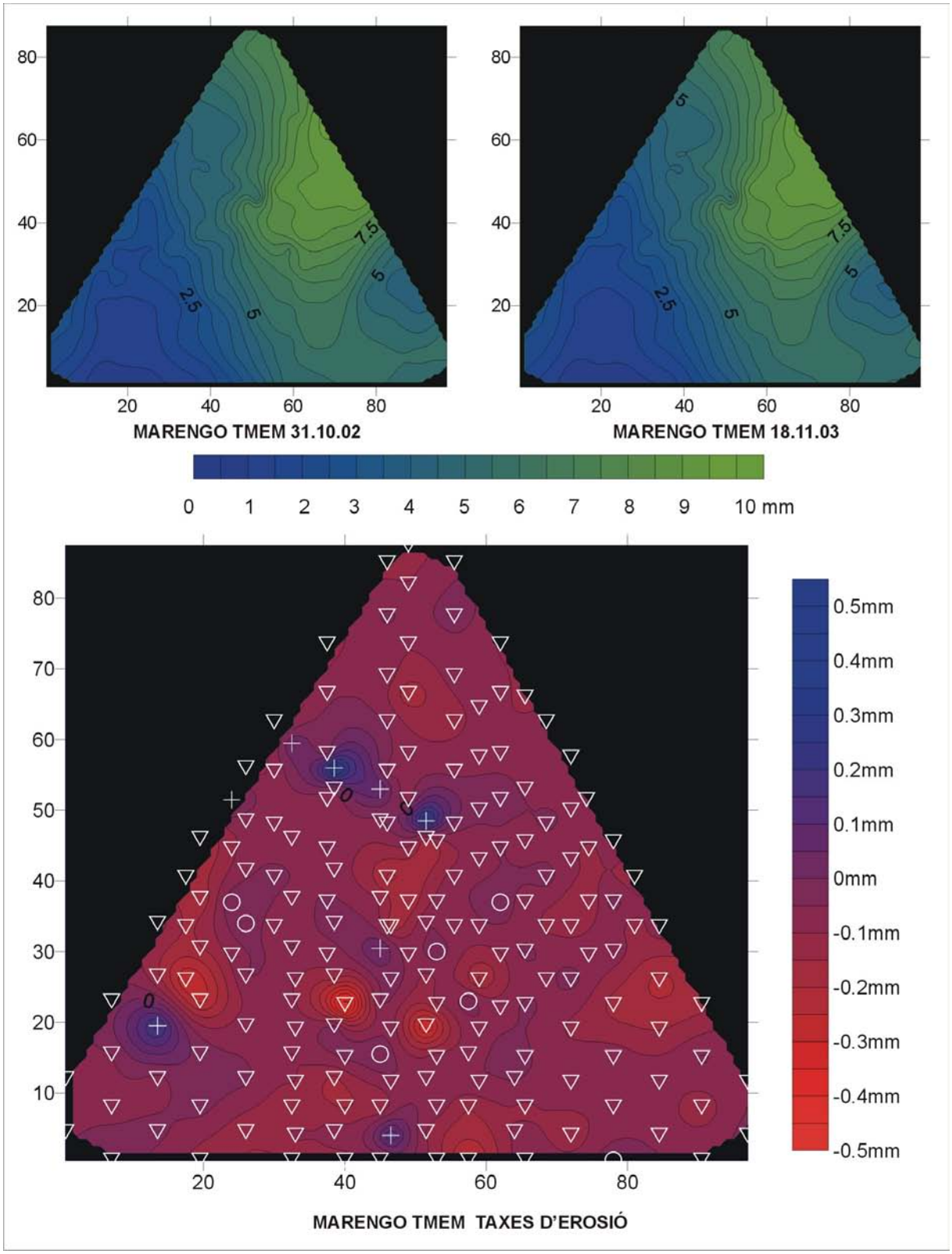


Fig. 2.21 Superposició de les microtopografies corresponents als mostratges i variacions d'alçària relativa a Marengo. Els símbols representen la tendència en termes relatius de cada coordenada: creus (> 0.001 mm = ascens), cercles (0,010 a – 0,010 mm = estable) i triangles (< -0,010 = descens).

	Marengo TMEM
N	188
Taxa d'erosió mitjana (mm·a^{-1})	-0.077
Desviació estàndard	0.086
Mínim (mm·a^{-1})	-0,510
Màxim (mm·a^{-1})	0,378
Taxa d'erosió neta surfer (mm·a^{-1})	- 0,042
Taxa d'erosió negativa surfer (mm·a^{-1})	-0,044
Taxa d'erosió positiva (mm·a^{-1})	0,002

Taula 2.13 Taxes d'erosió a Marengo calculades per la diferència dels valors d'altura relativa i per la diferència de volum entre microtopografies corresponents als mostratges del 31.10.02 i el 13.11.03.

Les taxes d'erosió, calculades per superposició de les microtopografies, són lleugerament diferents de les derivades de la diferència de registre entre lectures successives, tot i que del mateix ordre de magnitud. La taxa d'erosió neta és de -0,042 mm·a-1, la mitjana per a les coordenades descendents és de -0,044 mm·a^{-1} i la mitjana per a les coordenades ascendents de 0,002 mm·a^{-1}.

La consideració dels quartils permet entreveure que són les altures extremes aquelles que experimenten unes tendències més accentuades de bombament o ascens. El 2002 les mitjanes del primer i quart quartil són menors que el 2003, 2,030 a 1,846 mm i 8,077 a 8,055 mm. No obstant això, els quartils intermedis presenten la tendència inversa. Així la mitjana del segon quartil és de 4,300 mm el 2002 i de 4,216 mm el 2003. Per al tercer quartil la mitjana d'altura relativa oscil·la de 5,785 a 5,769 mm. Per tant les coordenades extremes, tant en positiu com en negatiu, experimenten tendències ascendents, mentre que és més probable que les coordenades intermèdies, pel que fa a l'altura, siguin més estables.

2.4.4
Variacions horàries de microtopografia a Marengo

Stephenson *et al*. (2004) ja havien assajat de caracteritzar el fenomen del bombament de la superfície rocosa (*rock surface swelling*) a la contrada de Marengo (Apollo Bay). N'obtenen valors de variació d'alçària relativa amb un rang que oscil·la de –1,970 a 1,681 mm. Els resultats de l'experiment d'abast temporal llarg a Hayley Point també deixa entreveure la superposició de cicles de bombament respecte de cicles de denudació, més llargs, de la superfície rocosa. Per aquest motiu, s'ha desenvolupat sobre la mateixa superfície l'experiment de seguiment horari.

El mostratge es realitzà el 13.11.03 de les 06:00 h a les 22:00 h i s'hi aixecaren microtopografies cada dues hores d'acord amb l'instrument i les característiques tècniques explicades a l'apartat anterior (Fig. 2.21). En paral·lel s'hi ha fet un seguiment de les variables de temperatura, humitat ambiental i temperatura de la roca en superfície i a 1,5 cm i 3 cm de profunditat, mitjançant un sensor compacte amb registre automàtic de dades HOBO® 4235. L'interval de registre de les variables ambientals és d'un minut. El sensor s'ha ubicat a l'ombra per tal d'evitar l'escalfament de l'aparell a causa de la insolació directa. La temperatura de la roca s'ha registrat mitjançant un altre sensor compacte amb registre automàtic de dades HOBO® 4235. Els sensors s'han ubicat a la superfície de la roca (protegits per un pegat de massilla) i a sengles forats, a 1,5 cm i 3 cm de profunditat, d'acord amb les experiències d'Smith i McGreevy (1983) i Kerr *et al*. (1984). Els forats, tot i ser d'un diàmetre semblant al

Fig. 2.21 Dispositiu instrumental del seguiment de les variacions de microtopografia horàries a Hayley Point, Marengo.

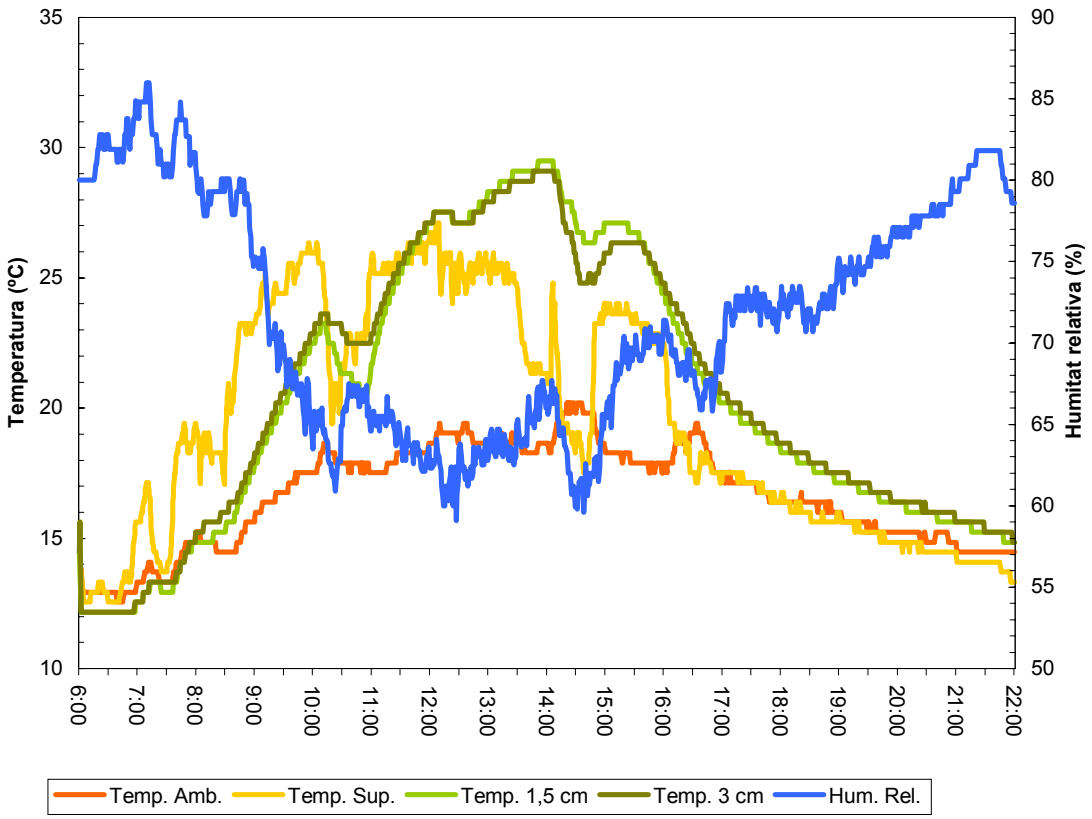


Fig. 2.22 Evolució dels paràmetres ambientals, de temperatura de la superfície de la roca i en profunditat durant l'experiment a Marengo.

del sensor, s'han emplenat amb una mescla de resina plàstica conductiva i pols de la mateixa roca, per tal d'evitar distorsions entre la temperatura de la roca i la temperatura ambiental (Warke, 2000). També s'han recollit fragments de roca per a la seva exploració amb microscopi electrònic de rastreig (SEM).

2.4.4.1 Paràmetres ambientals

Durant el mostratge les temperatures ambientals han fluctuat entre 12,9 ºC i 21ºC, mentre que els valors d'humitat relativa han variat del 57% al 86%, tot seguint un cicle invers una respecte de l'altra (Fig. 2.22).

Els valors màxims de temperatura ambiental s'hi donen el migdia devers les 14:30 h, mentre que els màxims d'humitat relativa hi apareixen a primera hora del matí i a darrera del vespre, 7:12 h i 21:36 h respectivament. Els canvis més acusats de les dues variables ambientals coincideixen entre les 9:00 h i les 10:30 h amb un descens de la humitat relativa del 80% al 61% i un ascens de la temperatura de 14,43 ºC a 18,02 ºC. Entre les 15:00 h i les 17:00 h es torna a registrar un canvi brusc d'ambdues variables, però en sentit invers a l'anterior. En aquest cas, la temperatura disminueix de 20,07 ºC a 17,22 ºC i la humitat relativa puja del 60% al 72,4%.

Les sèries de temperatura de la superfície de la roca i en profunditat varien al llarg del dia. A primera hora, la roca està freda respecte de la temperatura ambiental. Després de les 8:00 h, quan la llum del sol comença a incidir a la localitat d'estudi, la temperatura de la roca i l'ambiental són, si més no, iguals.

Amb el decurs del dia, i l'efecte acumulatiu d'hores d'insolació, la temperatura de la superfície de la roca arriba a les 11:30 h als 25 ºC, mentre que l'ambiental és de 17 ºC. A partir d'aquest moment, la temperatura en superfície comença a disminuir així com ho fa l'ambiental, però els registres de temperatura a –1,5 cm i –3 cm de profunditat de la roca segueixen augmentant la seva temperatura. Per exemple, a les 14:00 h la temperatura ambiental és de 18 ºC, de 22 ºC en superfície, de 30 ºC a –1,5 cm i de 29 ºC a –3 cm. Les diferències de temperatura entre els sensors en diferents profunditats no són gaire accentuades i sols a partir de les 18:00 h la temperatura a –3 cm és lleugerament superior als registres a –1,5 cm de profunditat.

Tot plegat, una vegada més, dibuixa un escenari amb gradients de temperatura ambiental i humitat relativa durant el dia, així com perfils de resposta diferenciada pel que fa a la temperatura entre superfície i profunditat de la roca (Fig. 2.22).

Altures relatives	06:00 h	08:00 h	10:00 h	12:00 h	14:00 h	16:00 h	18:00 h	20:00 h	22:00 h
N	188	188	188	188	188	188	188	188	188
Mitjana aritmètica	4,994	4,999	4,991	4,991	4,991	4,990	4,995	4,995	4,999
Límit inferior 95	4,656	4,661	4,652	4,653	4,653	4,652	4,658	4,657	4,661
Límit superior 95	5,332	5,337	5,329	5,329	5,329	5,328	5,333	5,333	5,337
Mitjana retallada 5%	4,977	4,982	4,973	4,974	4,974	4,972	4,978	4,977	4,982
Mitjana	5,124	5,132	5,121	5,122	5,126	5,130	5,122	5,105	5,133
Variància	5,492	5,490	5,494	5,496	5,494	5,495	5,480	5,494	5,490
Desviació típica	2,344	2,343	2,344	2,344	2,344	2,344	2,341	2,344	2,343
Mínim	0,455	0,459	0,452	0,452	0,454	0,454	0,465	0,472	0,469
Màxim	9,793	9,800	9,787	9,787	9,787	9,788	9,785	9,799	9,794
Rang	9,338	9,341	9,335	9,335	9,333	9,334	9,320	9,327	9,325
1r quartil	3,658	3,656	3,663	3,661	3,662	3,657	3,673	3,662	3,657
3r quartil	2,988	2,996	2,984	2,984	2,986	2,986	2,984	2,992	2,997
Amplària interquartils	6,646	6,652	6,647	6,645	6,648	6,643	6,657	6,654	6,654

Dif. altures relatives	06 a 08 h	08 a 10 h	10 a 12 h	12 a 14 h	14 a 16 h	16 a 18 h	18 a 20 h	20 a 22 h
N	188	188	188	188	188	188	188	188
Mitjana aritmètica	0,0046	-0,0084	0,0006	-0,0004	-0,0010	0,0057	-0,0003	0,0040
Límit inferior 95	0,0033	-0,0097	-0,0007	-0,0015	-0,0018	0,0038	-0,0040	0,0010
Límit superior 95	0,0059	-0,0071	0,0018	0,0008	-0,0002	0,0076	0,0033	0,0070
Mitjana retallada 5%	0,0047	-0,0085	0,0003	0,0005	-0,0011	0,0055	-0,0006	0,0014
Mitjana	0,0060	-0,0090	0,0000	0,0010	-0,0010	0,0090	-0,0010	0,0000
Variància	0,0001	0,0001	0,0001	0,0001	0,0000	0,0002	0,0006	0,0004
Desviació típica	0,0089	0,0089	0,0090	0,0079	0,0054	0,0132	0,0253	0,0209
Mínim	-0,0580	-0,0410	-0,0460	-0,0420	-0,0250	-0,0540	-0,1260	-0,0380
Màxim	0,055	0,055	0,073	0,033	0,037	0,123	0,261	0,181
Rang	0,113	0,096	0,119	0,075	0,062	0,177	0,387	0,219
1r quartil	0,006	0,008	0,003	0,003	0,004	0,017	0,013	0,007
3r quartil	0,002	-0,012	-0,001	-0,001	-0,003	-0,004	-0,007	-0,002
Amplària interquartils	0,008	-0,004	0,002	0,002	0,001	0,013	0,006	0,005

Taula 2.14 Resum estadístic per als valors d'altura relativa (superior) i de diferència d'altura relativa entre registres successius (inferior) de la superfície de Marengo. Unitats en mm.

2.4.4.2 Comportament de la superfície rocosa

El registre dels 188 valors d'altura relativa en intervals de dues hores, de les 6:00 h a les 22:00 h, aboca una matriu de 1.607 cotes microtopogràfiques. Se n'han calculat els principals paràmetres estadístics, bé com a valor d'alçària, bé com a diferència d'alçària entre registres (Taula 2.14). Per als dos conjunts de dades, les desviacions típiques i els errors de les mitjanes aritmètiques són grans. Per tant, és aconsellable, novament, contrastar el comportament de la superfície rocosa mitjançant tècniques d'estadística no paramètrica.

En comparar els estadístics descriptius per a les altures relatives i els de les diferències entre aquestes, el límit dels valors que amb una probabilitat del 95%, són susceptibles d'acollir la mitjana aritmètica no presenten variacions, excepte al tercer decimal per als valors absoluts d'alçària. Sí que són significatius, però, per a les diferències entre hores de mostratge.

Els topalls, inferior i superior, de la mitjana aritmètica suggereixen l'existència de diferències en la microtopografia de la superfície estudiada, ja que en tres intervals de mostratge la mitjana de la població canvia, en sentit positiu per sobre de zero i , altres dos cops, en sentit negatiu per sota de zero. La resta de les observacions temporals tenen un dels límits per sota zero i l'altre sobre zero (Taula 2.14 inferior). Observi's la diferència màxima entre altures relatives: el rang és de 0,387 mm i la mínima de 0,062 mm. Els màxims desplaçaments respecte del registre previ són de 0,261 mm per al vector positiu i de 0,126 mm per al negatiu.

Per tal d'avaluar si aquestes diferències són significatives o no ho són i quin n'és el seu patró, desenvoluparem la mateixa aproximació estadística i les consideracions teòriques que s'han discutit a l'apartat dedicat als experiments d'abast horari a Mallorca (apartat 2.3.4). El test de Friedman (Matthews, 1981) permetrà afirmar si ens trobam davant d'un conjunt de variacions significatives de la microtopografia. Així doncs, la hipòtesi nul·la, que nega l'existència de les variacions d'altura entre registres, pot ser rebutjada amb un marge prou ample de confiança ($\chi^2_r = 465{,}35$; $p = 0{,}000$).

	06 a 08 h	08 a 10 h	10 a 12 h	12 a 14 h	14 a 16 h	16 a 18 h	18 a 20 h
08 a 10 h	-10.7635 *0.0000*						
10 a 12 h	-7.0682 *0.0000*	-9.8193 *0.0000*					
12 a 14 h	-7.7404 *0.0000*	-9.4862 *0.0000*	-1.8837 *0.0596*				
14 a 16 h	-9.0871 *0.0000*	-9.6761 *0.0000*	-4.2541 *0.0000*	-4.5767 *0.0000*			
16 a 18 h	-0.4731 ***0.6361***	-10.6009 *0.0000*	-5.9122 *0.0000*	-6.2199 *0.0000*	-7.0273 *0.0000*		
18 a 20 h	-5.7948 *0.0000*	-6.8510 *0.0000*	-1.3391 *0.1805*	-1.1175 *0.2638*	-0.7632 ***0.4454***	-4.5907 *0.0000*	
20 a 22 h	-4.2270 *0.0000*	-10.2304 *0.0000*	-1.5082 *0.1315*	-2.0941 *0.0363*	-4.3931 *0.0000*	-4.2587 *0.0000*	-1.7774 *0.0755*

Taula 2.15 Paràmetres del test estadístic de Wilcoxon. Valors crítics i de probabilitats (en cursiva) per a cada parell de diferències d'altura relativa entre registres a Marengo.

El test no paramètric de Wilcoxon (Matthews, 1981) l'utilitzarem per constrastar si els canvis de microtopografia són homogenis en tota la superfície, o si bé es donen a mode de pegats.

La taula 2.15 en presenta els resultats. Excepte en dues observacions (en negreta a la taula 2.15), podem rebutjar la hipòtesi nul·la per la qual les diferències d'altura relativa es distribueixen de forma homogènia arreu de la superfície estudiada. Cal remarcar que no hi ha diferències significatives entre els registres de les 06:00 h a les 8:00 h i els de les 16:00 h a les 18:00h. Ambdós intervals es corresponen amb els episodis d'escalfament i refredament màxims de la superfície rocosa.

2.4.4.3 Tendències de la superfície rocosa

La figura 2.23 resumeix la tendència de la superfície rocosa d'acord amb l'algoritme que s'ha descrit prèviament a l'apartat 2.3.4 de la present memòria. Aquest algoritme classifica la superfície en tres categories (ascens, descens i estable) d'acord amb el signe dels valors i la posició d'altura relativa respecte a un filtre de ± 0,010 mm.

La majoria dels punts romanen estables durant tot el dia. A primera hora del matí n'hi ha un nombre important que descendeixen respecte la posició prèvia. El contrari succeeix l'horabaixa-vespre quan, bona part dels punts, comencen a ascendir.

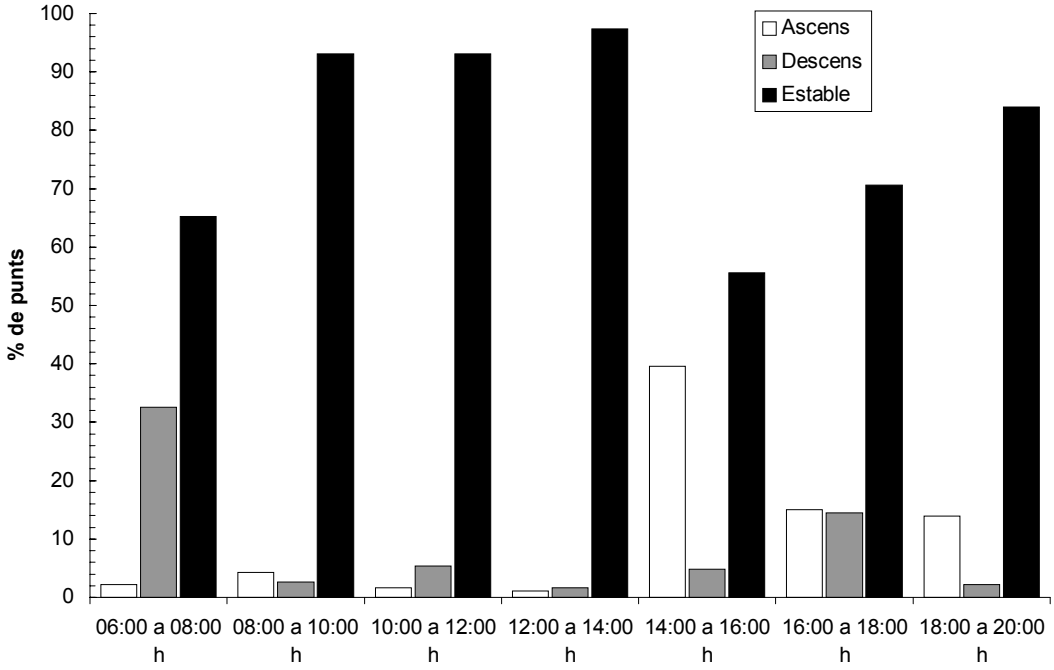


Fig. 2.23 Tendència de la superfície rocosa entre registres de mesura d'altura relativa amb el TMEM a Marengo.

	06 a 08 08 a 10	08 a 10 10 a 12	10 a 12 12 a 14	12 a 14 14 a 16	14 a 16 16 a 18	16 a 18 18 a 20	18 a 20 20 a 22	N	%
Descens a descens	0	1	0	0	1	1	1	4	0,31
Descens a estable	2	55	4	8	2	4	14	89	6,80
Descens a ascens	2	5	1	2	0	4	12	26	1,99
Estable a descens	50	2	6	1	8	15	2	84	6,42
Estable a estable	115	117	166	173	100	65	117	853	65,16
Estable a ascens	1	3	2	0	74	24	13	117	8,94
Ascens a descens	11	2	4	2	0	11	1	31	2,37
Ascens a estable	5	2	4	1	2	63	26	103	7,87
Ascens a ascens	1	0	0	0	0	0	1	2	0,15
Vector estable	122	174	174	182	104	132	157	1045	79,83
Vector ascendent	4	8	3	2	74	28	26	145	11,08
Vector descendent	61	5	10	3	9	27	4	119	9,09

Taula 2.16 Tipus de tendència i nombre de coordenades que l'experimenten en el desplaçament relatiu dels punts de la superfície rocosa a Marengo.

És important fer èmfasi en el fet de l'estabilitat de la superfície durant el dia. De les 10:00h a les 16:00 h, quan la llum del sol incideix de ple a la superfície, el nombre de punts que no experimenten cap desplaçament augmenta, llavors roman constant i la superfície sembla estabilitzar-se. Observi's que així com passa el dia s'incrementa el nombre de punts estables; després d'un ascens els punts romanen estables i es dóna una mena d'efecte d'acumulació, com si la superfície arribés a la seva capacitat màxima de contracció (Fig. 2.23).

Per avaluar si la tendència observada és estadísticament significativa utilitzarem el test de la χ^2. La hipòtesi nul·la del test és que no hi ha diferències en el nombre d'ascensos, descensos i punts estables durant el mostratge. És a dir, es compara una matriu amb el mateix nombre de casos per interval horari i categoria amb les observacions reals. Aquesta hipòtesi es pot rebutjar amb una probabilitat major del 99% (χ^2 = 419,46; p = 0,000). Així, doncs, hi ha una diferència significativa en el nombre de desplaçaments durant el dia. Bona part d'aquesta variació es troba a les primeres hores i a les darreres hores del dia.

De la superfície rocosa estudiada, se'n pot analitzar la tendència dels seus canvis d'altura relativa d'una categoria a una altra. La taula 2.16 en recull les distribucions de freqüències. Així, com a mínim, 1.045 punts romanen estables tot el dia, 145 coordenades experimenten ascensos i 119 descensos. El patró més habitual entre desplaçaments successius és mantenir-se estable després d'un període del mateix signe (853), seguit del pas d'una tendència estable a una d'ascens (117). Com a mínim, hi ha 103 punts que, després d'ascendir, passen a un període d'estabilitat i, pel que fa a les components negatives, és igual de probable que els descensos siguin antecedits pels episodis estables o viceversa. També, es pot avaluar mitjançant el test χ^2 si existeix un biaix temporal en la distribució de les tendències. La hipòtesi nul·la torna a ser rebutjada amb comoditat (χ^2 = 387,16; p = 0,000). Novament, es posa de manifest l'existència d'una diferència significativa entre el comportament i la tendència del tipus de desplaçament relatiu entre una categoria i una altra durant el mostratge.

Pel que fa a les hores que la superfície experimenta cada un dels diferents tipus de desplaçament, almenys hi ha 47 coordenades que mai no pateixen un cicle d'ascens i 85 que mai no descendeixen, fet que contrasta amb altres punts que no han deixat de moure's durant l'experiment.

Els episodis d'ascens i descens afecten bona part dels punts, com a mínim dues hores (119 i 83 respectivament), tot i que els períodes estables acostumen a operar sobre les coordenades entre 10 i 16 hores (Taula 2.17). En molts casos els ascensos i els descensos no depassen les dues hores de durada com ho posen de manifest 116 i 159 casos per a cada una de les tendències. Durades més llargues són

	2 h	4 h	6 h	8 h	10 h	12 h	14 h	16 h
Ascens	116	2	1	0	0	0	0	0
Descens	159	2	0	0	0	0	0	0
Estable	104	71	32	19	64	29	6	32

Taula 2.17 Temps operatiu dels moviments relatius de la superfície rocosa a Marengo.

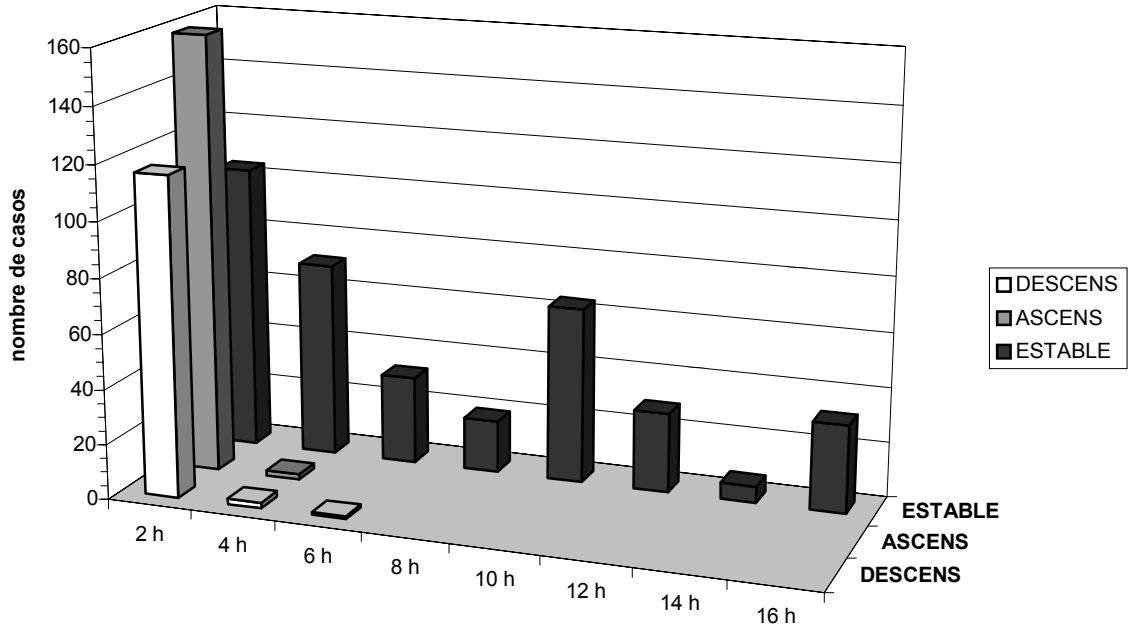


Fig. 2.24 Durada dels moviments relatius entre intervals de registre de la superfície de Marengo.

anecdòtiques (Fig. 2.24). En canvi, els episodis d'estabilitat tenen un espectre de continuïtat més ample, tot i que aquells intervals més freqüents són de 2, 4 i 10 hores.

2.4.4.4 Discussió

De l'anàlisi estadística en coneixem, com també passa amb la superfície estudiada a Mallorca, que, durant el mostratge, i com a mínim en intervals de dues hores, la microtopografia de la superfície rocosa estudiada a Marengo experimenta variacions significatives d'altura relativa. Aquestes fluctuacions no tenen un patró espacial ni temporal homogeni sobre la superfície de la roca.

Per al mostratge de Marengo, el patró general és d'un descens de les cotes microtopogràfiques respecte de les posicions prèvies al matí, de l'estabilitat de la superfície amb petites oscil·lacions durant les hores de màxima insolació i, finalment, d'un ascens generalitzat de la superfície en reduir-se la temperatura i augmentar la humitat relativa quan el sol deixa d'incidir sobre la plataforma litoral.

La seqüència descrita és contrària als efectes que es podrien esperar de la incidència de factors físics com l'expansió i contracció tèrmica, els canvis de tensió superficial i capil·lar relacionats amb el contingut en aigua de la roca (Mitchell i Hasley, 2000), o la meteorització per sals.

Les observacions de lupa binocular i les imatges del microscopi electrònic de rastreig constaten la presència d'una colonització liquènica de la superfície de la roca important, tot i que l'absència de cossos reproductius no n'ha permès la identificació. Les hifes apareixen arreu de la superfície rocosa, entre els grans, ocupant els buits i les microfractures des de la superfície de la mostra fins a pocs mil·límetres de profunditat (Fig. 2.25.)

El cicle fisiològic dels líquens ja ha estat descrit en detall a l'apartat de continguts en paral·lel, dedicat a la costa rocosa de Mallorca. En poques paraules es podria resumir com una seqüència d'expansió i contracció de les hifes, fins a un 80% del seu volum, d'acord amb la incidència de la llum solar sobre la roca i el descens de la humitat relativa, la qual cosa coincideix, a grans trets, amb el patró de la superfície de la roca observat instrumentalment.

Es pot plantejar el dubte de si allò que s'ha mesurat és precisament només un ascens i un descens biològics i no un ascens i descens de la superfície del rocam. Però, de fet, les pròpies imatges de microscopi electrònic de rastreig i les làmines primes (Fig. 2.26) permeten entreveure la complexa colonització biològica de la roca. Ens trobam amb una pàtina amb característiques de nínxol ecològic endo i epilítica (Golubic *et al.*, 1981), de manera que superfície i organisme esdevenen u. Tot i que no prou contundent, una altra evidència que posaria de manifest el paper actiu de l'alteració dels líquens serien els abundants

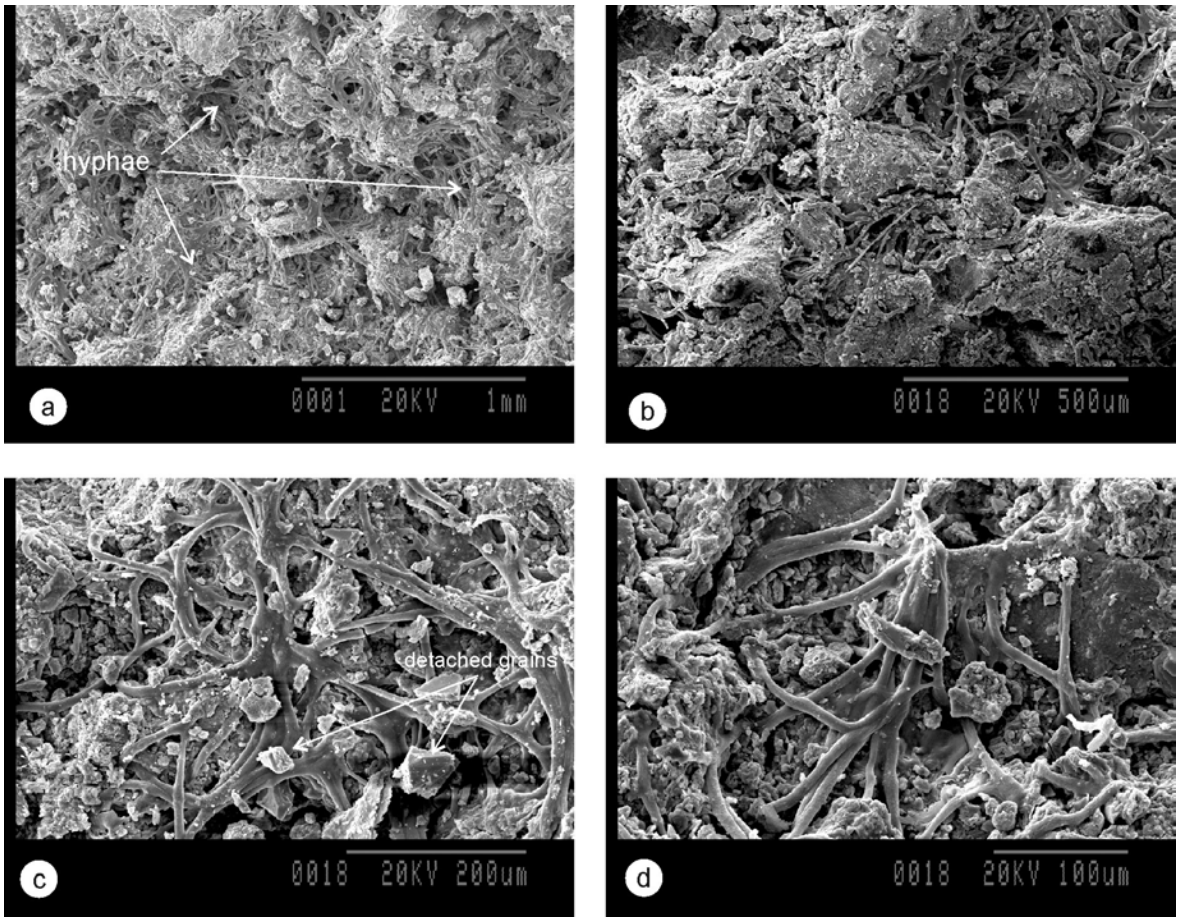


Fig. 2.25 Imatges de microscopi electrònic de rastreig (SEM) de la superfície rocosa de Marengo on s'hi pot apreciar la important presència de la pàtina biològica i com les hifes entapissen la superfície, s'entrellacen amb els grans de la roca i en penetren en els buits. A les imatges a i b s'observa com el líquen ocupa la porositat de la roca. A c i d, el contrast entre la superfície colonitzada que subjecta grans a punt de desprendre's i d'altres que ja ho estan (indicats amb fletxes).

exemples de descamacions presents arreu dels penyasegats i plataformes de Marengo. El gruix de les escates coincideix amb la màxima profunditat de penetració de les hifes dels líquens (Fig. 2.27).

El diàmetre de les hifes, a les mostres estudiades, és de 16 μm. Per tant, canvis en el 80% del seu volum poden incrementar o reduir, al voltant de 12 μm, el diàmetre de les hifes. Aquestes oscil·lacions poden abraçar des de gruixes de les hifes de 0,022 mm a 0,099 mm. El rang dels valors de canvi de les hifes coincideix amb els ordres de magnitud de canvis en la superfície rocosa que s'ha quantificat a Marengo (Taula 2.14).

Així doncs, tot sembla indicar que l'expansió i la contracció de la superfície rocosa caracteritzada a Marengo segueix el cicle fisiològic dels líquens. Des de les 08:00 h la superfície rocosa es contreu i roman estable fins a la posta de Sol, quan torna a registrar moviments ascendents. L'estabilitat de la superfície durant el dia augmenta i, en especial, després de cada episodi de descens de les coordenades. La màxima contracció es dóna durant l'escalfament màxim de la superfície rocosa, coincidint amb el mínim d'humitat relativa. A partir del refredament i l'augment de temperatura de les 16:00 h, la superfície torna, de nou, a expandir-se. La quantificació instrumental posa de manifest que diferències de 5 ºC o de 25 punts en la humitat relativa són suficients per produir moviments relatius de la superfície rocosa de –0,126 mm a 0,261 mm. Mecanisme que, dia rere dia, actua com a procés en la fatiga de la roca i n'afavoreix la disgregació granular.

2.5 Patrons i taxes d'erosió a la costa rocosa calculades mitjançant escàner làser (LS)

S'han caracteritzat les taxes de denudació de la costa rocosa en cinc localitats de l'illa de Mallorca i, en cada una d'elles, en dues superfícies localitzades en el domini supralitoral del perfil. L'abast temporal dels mostratges és d'un any. Donades les característiques de tècniques i de transport de l'escàner làser, d'entrada, cal fer èmfasi en el fet que, de totes les superfícies rocoses de la zona d'estudi, les àrees

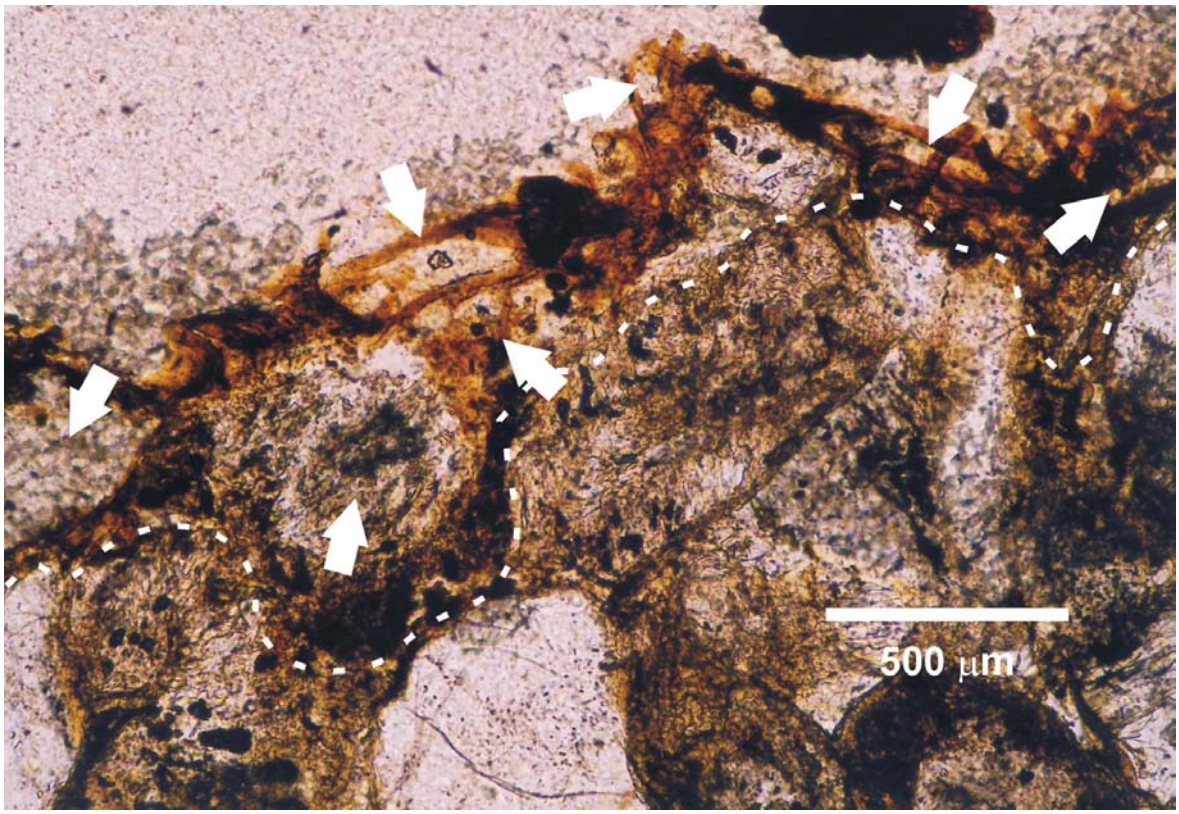


Fig. 2.26 Làmina prima de la superfície rocosa de Marengo colonitzada per líquens. El biofilm apareix fins a una profunditat de 0,16 mm de la superfície, amb hifes que arriben a penetrar fins a 0,8 mm (línia de punts). Les fletxes indiquen exemples de grans de roca enrevoltats i subjectats per les hifes.

escanejades en són les més horitzontals i menys rugoses, per la qual cosa ja, d'un bon principi, introduïm un biaix important en el mostratge. Això no obstant, val a dir que l'estudi de les taxes de denudació amb l'escàner làser no persegueix tant quantificar l'erosió en la component vertical de la costa, com avaluar si els ordres de magnitud entre les taxes calculades amb el micròmetre de dial mòbil i les calculades amb l'escàner làser són comparables.

Fig. 2.27 Exemples de descamacions al voltant de la superfície rocosa mostrejada a Marengo. Observi's l'escàs gruix de les escates de roca despreses, entre 1 i 2 mm, tot coincidint amb la màxima profunditat de penetració de les hifes.

2.5.1 Localitats d'estudi

Les costes rocoses són l'element més característic del litoral de Mallorca. El tipus de penya-segat i el seu perfil estan relacionats amb les característiques i distribució de les grans unitats morfoestructurals de l'illa (Fig. 2.28). A la Serra de Tramuntana i a la de Llevant, els penya-segats es desenvolupen sobre calcàries plegades del Mesozoic fins al Miocè Inferior i Mitjà, amb façanes de penya-segat de 3 a 50 m d'alçària i, en alguns casos, entrant a plom 5 o 10 m mar endins. En aquesta unitat morfoestructural, les plataformes litorals hi apareixen de forma puntual, amb un fort control estructural (Gelabert *et al*., 1992). Així doncs, en el rocam carbonatat del Juràssic Inferior és difícil trobar plataformes litorals arran de la intensa fracturació i control tectònic que fa caure els perfils de costa, abruptament, dins la mar. Això no obstant, a les turbidites neògenes o a les dolomies del Retià, sí que hi apareixen plataformes, tot i que amb un desenvolupament discret.

Les calcarenites postorogèniques del Miocè Superior afloren a les unitats morfoestructurals de les Marines de Llevant i de Migjorn. El perfil típic d'aquest sector de costa és el d'una costa esglaonada relacionada amb els nivells marins del Plistocè (Butzer, 1962). Aquest seguit de relleixos tenen, també, el seu origen en la

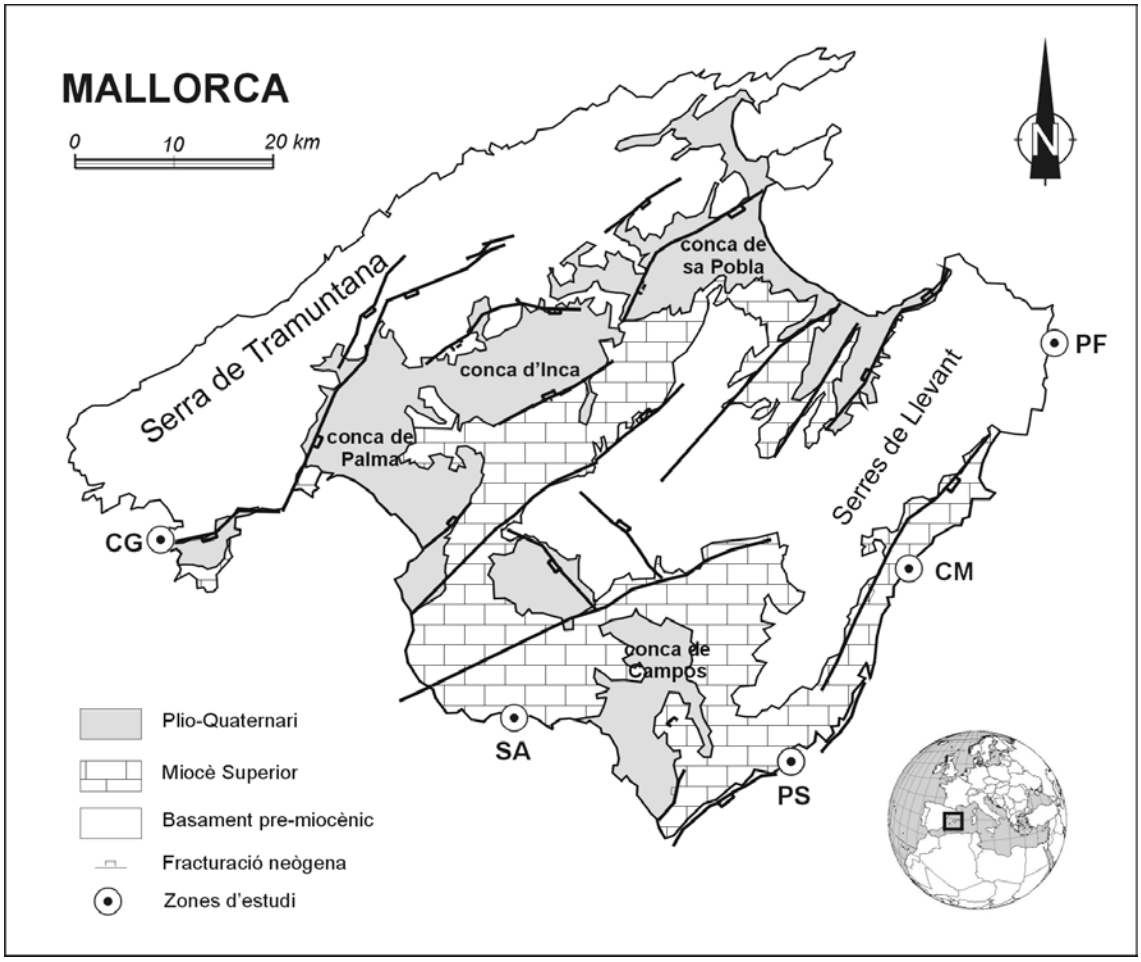


Fig. 2.28 Localitats d'estudi per al càlcul de la taxa d'erosió de la costa rocosa mitjançant la tècnica instrumental de l'escàner làser.

geometria i diferències geomecàniques i les fàcies dels materials tabulars del Miocè Superior (Fornós i Pomar, 1984; Pomar i Ward, 1999). Els penya-segats tallats als rocams del Miocè varien de 3 a 20 m d'alçària. Les plataformes, tot i que apareixen a pegats, són més contínues a la línia de costa que no a la unitat morfoestructural de la Serra de Tramuntana.

Les localitats d'estudi abasten cada una de les grans unitats geomòrfiques de l'illa de Mallorca i permeten avaluar-ne les taxes d'erosió sobre diferents litologies i exposicions (Fig. 2.28):

La **Cala d'en Guixar** (CG) es troba situada al vessant oest de la península de Santa Ponça, entre Punta Negra i la badia de ses Penyes Roges, al peu de l'extrem meridional de la Serra de Tramuntana. El relleu d'aquest sector de costa s'ha d'interpretar com el resultat d'una evolució complexa amb interferències dels dominis terrestre i marí. Cossos sedimentaris de ventalls al·luvials, platges, dunes i dipòsits marins d'ambients restringits d'edat plio-quaternària apareixen escampats arreu d'aquest sector de costa. El basament està format per dolomies juràssiques plegades. La línia de costa és força articulada i els penya-segats tenen una alçària d'1m a 10 m en funció dels accidents de l'antic paleorelleu.

La zona d'estudi de **s'Alavern** (SA) es troba a l'est de Cala Pi. Es tracta d'una plataforma litoral de 10 m d'amplària desenvolupada sobre biocalcarenites, més o menys cimentades, de la Unitat Escullosa del Miocè Superior. Hi segueix un relleix a 1,5 m fossilitzat per cossos dunars del Würm (Cuerda i Sacarès, 1992), sobre el qual descansa un penya-segat de 15 m tallat sobre les calcàries del Complex Terminal (Fornós i Pomar, 1983) que resta coronat pels cossos dunars i interdunars del Plistocè.

La **Punta des Sivinar** (PS), entre Cala Figuera i s'Amarador, és un sector litoral típic de la marina de Llevant. El rocam és força semblant al de s'Alavern i el penya-segat s'aixeca uns 15 m per sobre d'una rasa a 2 m del nivell marí mitjà. En són abundants les formes de rascler litoral.

Cala Murada (CM) es troba a 10 km al nord del Port de Felanitx. A diferència de les anteriors, aquí els penya-segats només els construeixen els materials durs de la Unitat Escullosa del Miocè superior

	CG	SA	PS	CM	PF
Litologia	Bretxa dolomítica	Calcarenita	Calcarenita	Calcarenita	Calcària
Edat	Retià	Miocè Superior	Miocè Superior	Miocè Superior	Cretaci
Geologia	Plegada	Tabular	Tabular	Tabular	Plegada
Composició	86,44% dolomia 11,07% calcita	61,40% dolomia 38,96% calcita	86,5% dolomia 13,37% calcita	96,57% calcita	91,40 % calcita
Rebot escleròmetre	59,9 – 58,8 dura	56,2 – 41,37 moderadament dura	60,48 – 61,67 dura	51,6 - 49,7 moderadament dura	59,8 – 63,7 dura
Densitat	2,60 $g \cdot cm^{-3}$	2,40 $g \cdot cm^{-3}$	2,45 $g \cdot cm^{-3}$	2,12 $g \cdot cm^{-3}$	2,35 $g \cdot cm^{-3}$
Porositat	10,66 %	28,47%	24,25 %	7,68 %	6,61 %

Taula 2.18 Característiques litològiques del rocam de les costes amb seguiment d'escàner làser a Mallorca.

(Pomar,1991). A grans trets, aquest sector, destaca per una paret força vertical arran de mar, amb algun relleix i un perfil esglaonat terra endins.

La **Punta des Faralló** (PF), a les Serres de Llevant, és un sector de costa retallat sobre calcàries mesozoiques fortament plegades i amb una important esquistositat horitzontal. Els penya-segats tenen alçades, més aviat modestes, d'1,5 m a 4 m. En aquells sectors, on l'estructura i les discontinuïtats ho permeten, s'hi desenvolupen plataformes litorals de poc més d'1 m o 2 m d'amplària.

2.5.2
Materials i disseny experimental

Les superfícies s'han escanejat dos cops. La primera campanya es desenvolupà els mesos de maig a juliol de 2000 i la segona de maig a juny de 2001. L'àrea escanejada és de 200 x 200 mm amb una resolució de registre espacial per a cada mil·límetre. Aquest fet implica que les microtopografies de cada localitat suposen un volum de 40.000 valors d'alçària relativa.

Sempre que l'aflorament ho ha permès, s'ha escanejat una superfície a la zona d'acció dels esquits, de vegades agranada per l'onatge, mentre que l'altra superfície s'ubicava en el domini del ruixim. Atès que les mesures d'alçària relativa queden registrades automàticament a l'ordinador, poden ser tractades per un programari que permeti treballar amb models digitals del terreny. Mitjançant el programari Surfer© es pot avaluar si hi ha alguna mena d'incidència o error en l'aixecament de la microtopografia.

El mateix programari permet el càlcul de les taxes d'erosió per a les superfícies, a partir de la resta, en termes de volum (mm^3) de les microtopografies successives. A fi i efecte d'estandarditzar la taxa d'erosió, es divideix per la superfície escanejada (mm^2). En aquells casos en els quals la diferència de volum queda sota l'error instrumental (± 0,025), ja no es calcula la taxa d'erosió.

La taula 2.18 resumeix les característiques litològiques del rocam de les superfícies estudiades, la seva posició i els paràmetres geomecànics. A grans trets, tenim dos conjunts de substrat. D'una banda, aquells que, tot i que força durs a l'escala de Selby (1980), estan intensament fracturats i tenen una mida de gra heterogènia, com és el cas de les bretxes juràssiques de Cala d'en Guixar i les calcàries de Punta des Faralló. D'altra banda, tenim aquell conjunt de roques del Miocè Superior que, tot i que texturalment semblants arran de la seva diagènesi, tenen una duresa o resistència mecànica diferents. Aquest és el cas de Cala Murada i s'Alavern, de duresa moderada a l'escala de Selby (1980), i la Punta des Sivinar amb una duresa forta.

Superfície	Domini hidrodinàmic	Període de mostratge	Taxa d'erosió ($mm \cdot a^{-1}$)	Error instrumental
CGP1L1	Zona d'esquits	2000 – 2001	1,377	± 0,025
CGP1L2	Zona de ruixim	2000 – 2001	0,343	± 0,025
CGP2L1	Zona d'esquits	2000 – 2001	1,097	± 0,025
CGP2L2	Zona de ruixim	2000 – 2001	1,234	± 0,025
CMP1L1	Zona d'esquits	2000 – 2001	0,754	± 0,025
PFP1L1	Zona d'esquits	2000 – 2001	0,411	± 0,025
PSP1L1	Zona d'esquits	2000 – 2001	0,514	± 0,025
PSP1L2	Zona de ruixim	2000 – 2001	0,960	± 0,025
SAP1L1	Zona d'esquits	2000 – 2001	0,103	± 0,025
SAP1L2	Zona de ruixim	2000 – 2001	0,411	± 0,025

Taula 2.19 Taxes d'erosió de la costa rocosa calculades mitjançant l'escàner làser.

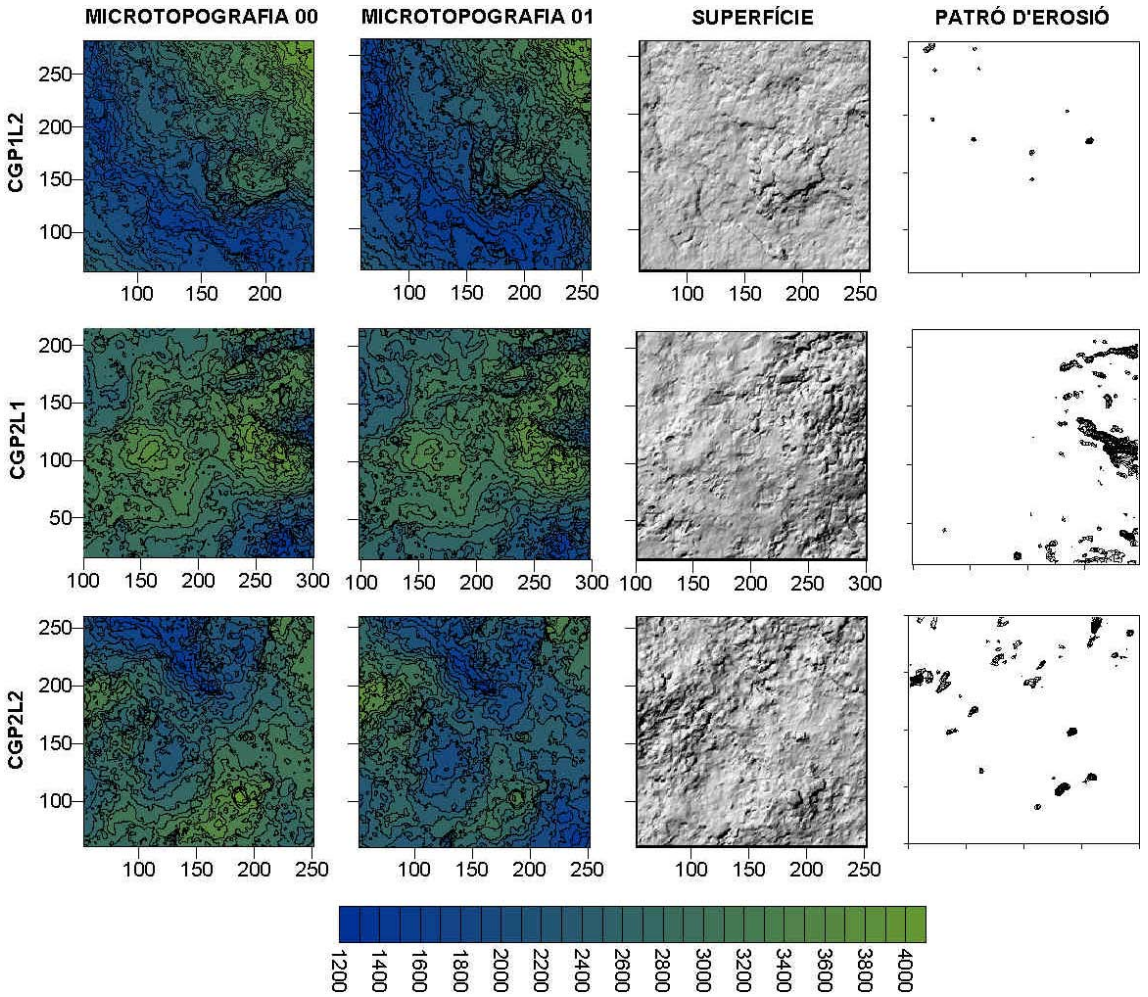


Fig. 2.29 Patrons i taxes d'erosió, per superposició de microtopografies obtingudes amb l'escàner làser, sobre bretxes juràssiques. A l'escala gràfica els valors de microtopografia es donen com l'angle de retorn del làser (1200 LS = 30 mm i 4000 LS = 100 mm).

2.5.3
Resultats i discussió

Els resultats de les taxes d'erosió calculades a partir de la superposició de les microtopografies obtingudes amb l'escàner làser es presenta a la taula 2.19. Les taxes d'erosió oscil·len entre el valor mínim de 0,343 mm·a^{-1} de la superfície CG_P1_L2, ubicada al domini d'acció del ruixim, i el màxim, també a la mateixa localitat i en posició semblant, de la superfície CG_P2_L2, amb 1,234 mm·a^{-1}. No hi ha una relació directa entre la duresa i les taxes d'erosió, ja que aquestes són més altes a les bretxes plegades de Cala d'en Guixar, que no a les biocalcarenites blanes de s'Alavern.

La classificació de la mida de gra en podria ser la causa. A la Fig. 2.29 i 2.30 es pot apreciar l'efecte dels còdols de la bretxa juràssica sobre la textura i l'aparença de la superfície rocosa. De la mateixa manera, crida l'atenció que les taxes calculades a les superfícies ubicades a la zona de ruixim acostumen a ser més altes que no les velocitats de denudació de les superfícies de la zona d'esquits. En aquesta línia, d'un domini hidrodinàmic a l'altre, hi ha al voltant de 3 dècimes de mil·límetre de diferència. A s'Alavern, la zona d'esquits registra un descens per a l'àrea escanejada de 0,103 mm·a^{-1} i a la de ruixim de 0,411 mm·a^{-1}. A la Punta des Sivinar la proporció és semblant, de 0,514 mm·a^{-1} a 0,960 mm·a^{-}1. Tot i això, per a cada localitat, llevat del cas esmentat de Cala d'en Guixar, es manté el mateix ordre de magnitud entre les taxes d'erosió de les superfícies.

Un altre aspecte a concretar dels resultats de la superposició de les microtopografies de l'escàner làser, són els patrons espacials de meteorització. A la Fig. 2.30, els gràfics corresponents a la interpolació de les taxes d'erosió presenten la diferència entre les superfícies concentrades en uns pocs punts. Hi ha superfícies estudiades, on el descens de la superfície queda emmascarat per l'arrabassament d'un còdol de la bretxa, com és el cas de CG_P1_L2. En canvi, a d'altres, la distribució del procés, tot i no ser anisòtropa, afecta la major part de la superfície escanejada, com a CG_P2_L2 o SA_P1_L2.

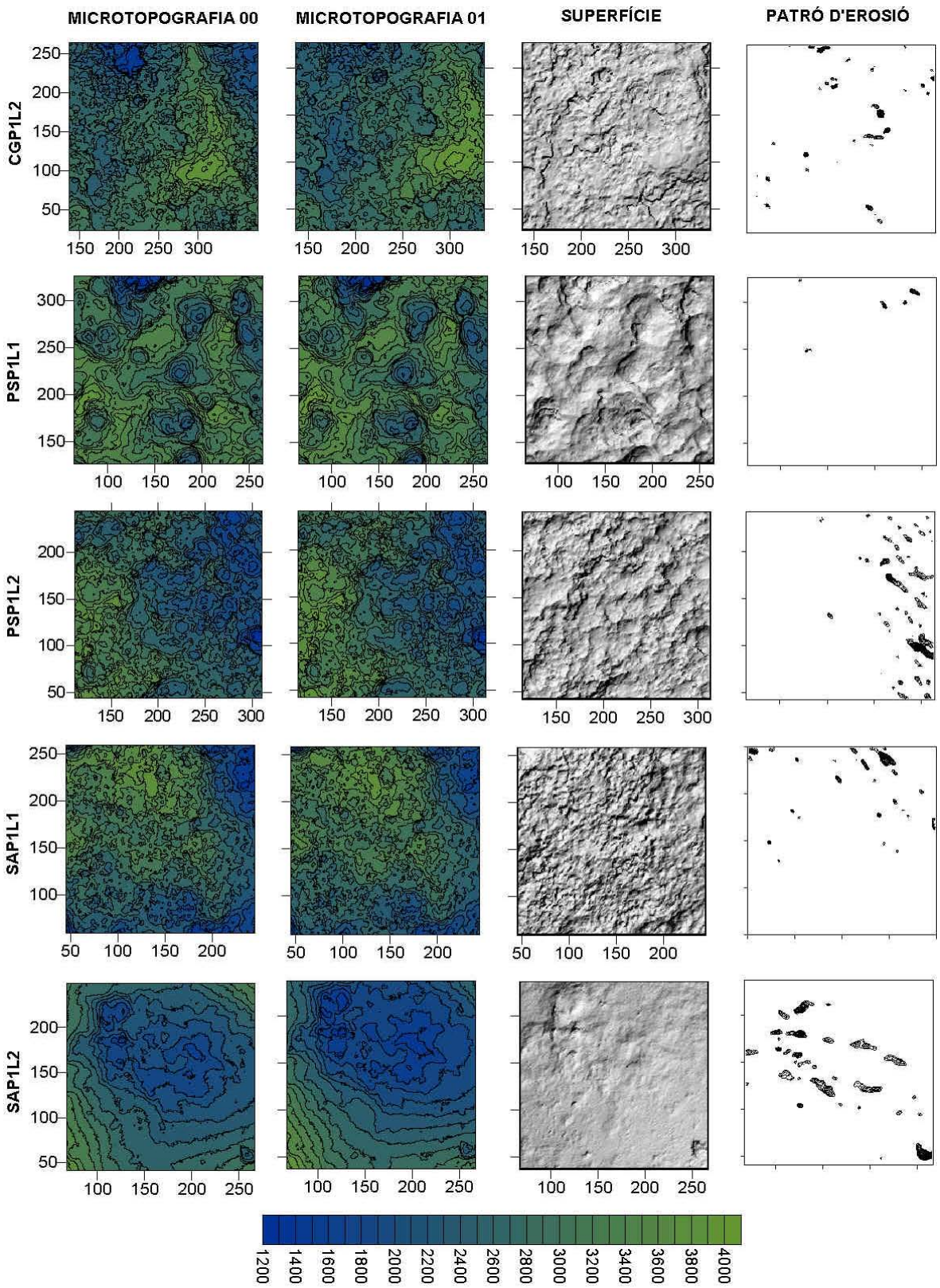


Fig. 2.30 Patrons i taxes d'erosió, per superposició de microtopografies obtingudes amb l'escàner làser, sobre calcarenites miocenes. A l'escala gràfica els valors de microtopografia es donen com a l'angle de retorn del làser (1200 LS = 30 mm i 4000 LS = 100 mm).

2.6
Patrons i taxes d'erosió a la costa rocosa calculades mitjançant tests d'exposició (*weight-loss rock tablets*)

Els tests d'exposició, els principis operatius dels quals ja s'han descrit a l'apartat 2.2.3, són una aproximació clàssica al càlcul de l'erosió i de la meteorització subedàfica (Matsukura i Hirose, 1999) de la denudació dels paisatges kàrstics (Crabtree i Trudgill, 1985; Jennings, 1981) i de la meteorització del patrimoni arquitectònic (Moses, 1996; Trudgill *et al*., 1990). Pel que fa les costes rocoses, els tests d'exposició s'han utilitzat per separar la contribució dels processos de meteorització química, respecte dels d'acció mecànica de l'onatge i la component biològica (Trudgill, 1976), o bé per quantificar el balanç erosió-protecció que la microflora i la microfauna desenvolupen sobre el rocam costaner (Naylor i Viles, 2002; Sartoretto, 1998; Viles *et al*., 2000).

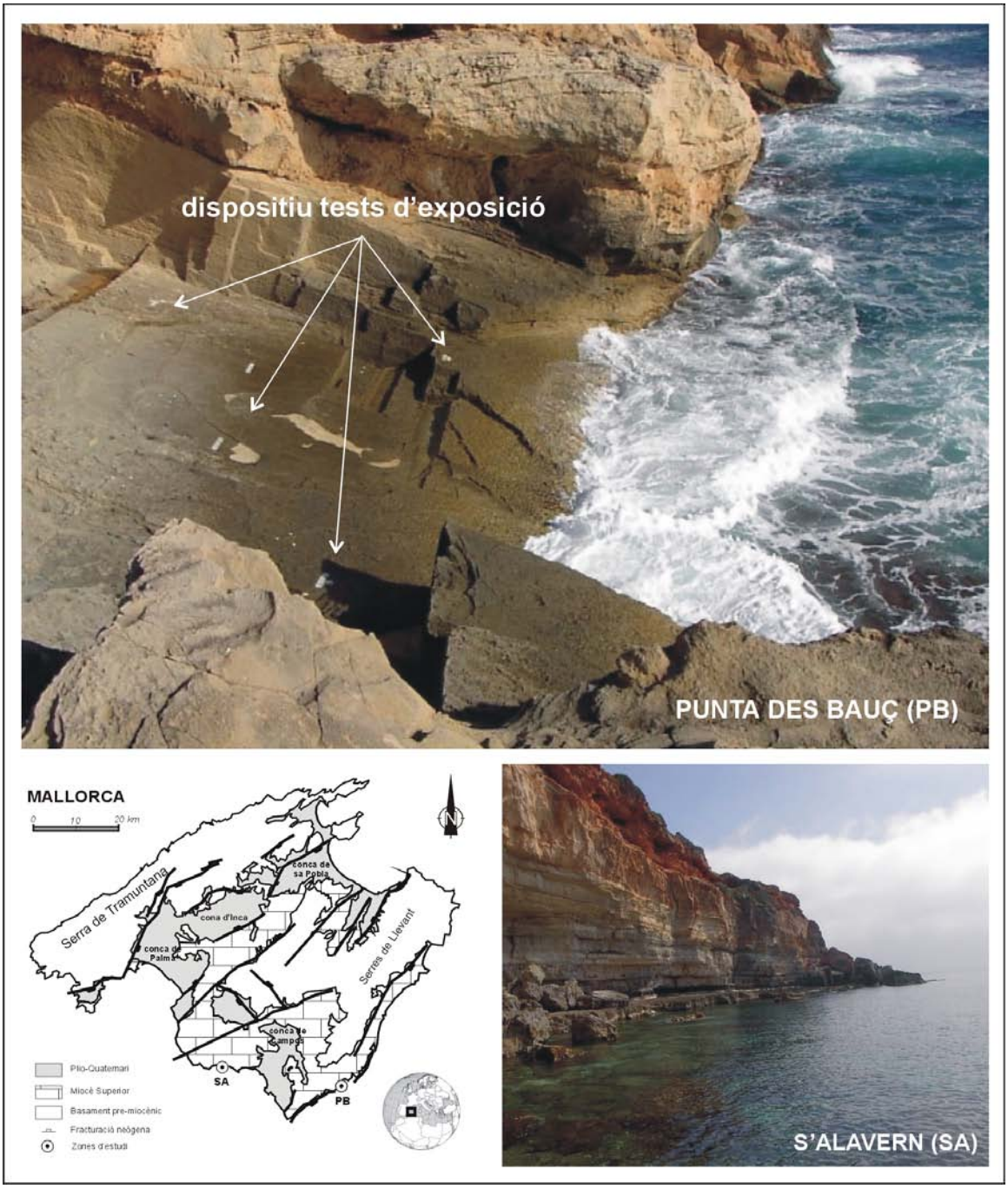


Fig. 2.31 Localitats d'estudi on s'han desenvolupat els experiments de tests d'exposició de peces de roca (*weight-loss rock tablets*).

	Punta des Bauç (PB)	S'Alavern (SA)
Descripció	Eolianites carbonatades del Quaternari	Biocalcarenites del Miocè superior
Composició	Arenes bioclàstiques amb una composició superior al 50% de rodofícies, seguides de fragments de mol·luscs, d'equinoïdeus, foraminífers i briozous. En destaca una laminació acusada, formada per l'alternança de làmines d'arenes mitjanes amb làmines d'arenes fines de 2 a 5 mm de gruixa. Bona classificació	Calcarenita bioclàstica amb abundants foraminífers. Presenta un elevat grau de micritització amb una porositat intergranular parcialment ocupada per cristalls de calcita.
Carbonats	98,50%	98,10%
Porositat	24,25%	28,47%
Densitat	1,53 $g \cdot cm^{-3}$	1,57 $g \cdot cm^{-3}$

Taula 2.20 Característiques de les litologies de les peces de roca utilitzades als tests d'exposició.

2.6.1
Àrea d'estudi

L'experiment s'ha desenvolupat a dues localitats de la costa meridional de Mallorca (Fig. 2.31). La primera, s'Alavern (SA), ja descrita a l'apartat 2.3.1 en referència a les experiències amb el TMEM, es troba al sud de l'illa i la caracteritzen uns penya-segats de timbes verticals d'entre 15 m i 20 m d'amplària que tallen els materials del Miocè superior i una seqüència de dunes i paleosòls quaternaris. Quan els enderrossalls ho permeten, es topa amb una plataforma de poc més de 10 m d'amplària sobre la qual s'ha instal·lat el dispositiu del test d'exposició.

La segona localitat d'estudi, sa Punta des Bauç (PB), es localitza a la costa SE de l'illa. El rocam es correspon amb les eolianites carbonatades del Quaternari (Clemmensen *et al*., 2001) que fossilitzen el penya-segat modelat sobre els materials del Miocè Superior i que, fins no fa gaire temps enrere, tot i la mala qualitat d'aquest aflorament (Rosselló, 1962), s'explotà com a pedrera de marès. El perfil de la zona d'estudi es caracteritza per una superfície lleugerament inclinada, que segueix l'estratificació de la duna fins que trenca al mar amb una plataforma litoral colonitzada per macròfits (*Cystoceira sp*.). La superfície és quasi bé llisa, a excepció feta d'algun trencament relacionat amb l'explotació de la pedrera, o bé amb cicatrius de processos de descamació (*flaking*).

2.6.2
Materials i disseny experimental

Per al present experiment s'han utilitzat un total de 225 peces circulars de roca de 20 mm de diàmetre i 5 mm de gruixa. La roca, per a la confecció de les peces, s'ha recollit a les mateixes localitats d'estudi, tot procurant que fos com més semblant millor al rocam sobre el qual haurien d'instal·lar-se. Cent cinc peces de roca s'han elaborat a partir de les biocalcarenites del Miocè Superior i altres cent vint a partir de les eolianites carbonatades quaternàries. La descripció litològica, de composició, contingut en carbonats, porositat i densitat es resumeix a la taula 2.20. La massa mitjana de les peces d'eolianita és de 2,92 g i la de les peces de biocalcarenites de 2,98 g.

Les peces de roca, prèviament rentades, assecades i pesades s'empaquetaren en grups de tres –a fi i efecte de tenir rèpliques de cada un dels valors– dins una bossa de niló amb un ordit i una trama de 63 μm per protegir-les dels efectes de l'abrasió i dels organismes brostejadors.

Les bosses s'instal·laren a les localitats d'estudi mitjançant un dispositiu que consisteix en una placa de plàstic amb una perforació cilíndrica en què el centre, a la vegada que se subjecta a la roca mitjançant uns grampons d'acer, permet l'exposició de les peces als agents ambientals. Els dispositius es fixaren al llarg d'un perfil perpendicular a costa en intervals de 2 a 3 m, amb un mínim de cinc dispositius (quinze peces de roca, per interval). Així queden caracteritzades cada una de les zones hidrodinàmiques de la costa i de les zones biològiques.

2.6.3
Resultats

De les 225 peces de roca exposades inicialment entre les dues localitats, se n'han recuperades un total de 195, fet que suposa un èxit del mostratge del 86,6%. Les peces de roca perdudes es corresponen amb aquells dispositius que han estat arrabassats per l'onatge, o bé per l'esqueixament de les bosses de niló. Quant a la distribució espacial dels dispositius perduts, són més nombrosos els més propers a la mar.

Ambdues localitats registren un patró similar pel que fa al comportament de les taxes d'erosió de les peces de roca, ja que els valors de diferència de pes inicial i final disminueixen de mar cap a terra. Així doncs, la diferència mitjana de pes de les peces de roca, a la Punta des Bauç (Taula 2.21), és de 0,95 $mm \cdot a^{-1}$, amb un rang que abraça de les taxes mitjanes mínimes amb