

KARREN LITORAL I BIOEROSIÓ A LES COSTES ROCOSSES CARBONATADES DE MALLORCA:

Resum de les principals contribucions de la tesi doctoral "*Patrons, taxes i formes d'erosió a les costes rocoses carbonatades de Mallorca*"

per Lluís GÓMEZ-PUJOL ^{1,2}

Resum

El karren litoral és un tipus de microrrelleu ben característic de les costes rocoses de Mallorca. Així doncs, per tal de gaudir d'un coneixement més ferm dels processos, agents i ritmes que hi estan relacionats, es procedeix a l'estudi dels patrons, taxes i formes d'erosió a les costes rocoses carbonatades de Mallorca a partir de la utilització de diferents tècniques instrumentals i experiències de laboratori i camp per tal de desentrellar la contribució dels agents i processos d'alteració i erosió en la formació del relleu litoral. Es dedica una particular atenció a la contribució dels organismes brostejadors (*Patella rustica* i *Melaraphe neritoides*) en la destrucció de les costes rocoses, així com també al paper dels biofilms que entapissen i ocupen la porositat de la roca i que estan relacionats bé amb les variacions de microtopografia o bé amb el control de la capacitat agressiva de l'aigua retinguda al conjunt de formes del karren litoral. El principal interès del treball realitzat és posar de manifest que a una escala temporal curta, diària, i considerant aquells processos més continus en la dinàmica erosiva de les costes rocoses, la component biològica juga un paper capital en l'erosió del rocam.

Abstract

Coastal karren is a conspicuous feature in Mallorcan rock coast. In order to understand which are the processes, agents and the velocities of its action, this study deals with the quantification of the rates, patterns and morphologies of erosion at carbonate rock coasts of Mallorca. The approach takes into account different instrumental techniques and also field and laboratory experiments in order to separate the contribution of the different agents and processes in rock coast landform development. The investigation has been specially oriented towards the analysis of the contribution of grazing organisms and the role of biofilms in the evolution of coastal karren forms. The main contribution of the work is to point up that at short time scales and taking into account the processes that operate in a continuous way on the rock coast erosion dynamics, the biological component is very important in the coast erosion.

Introducció

El present article té per objecte sintetitzar i donar a conèixer el contingut de la memòria presentada per a l'obtenció del doctorat en Geografia, que sota la direcció del Dr. Joan J. Fornós es desenvolupà al Departament de Ciències de la Terra de la Universitat de les Illes Balears i que pren per títol ***Patrons, taxes i formes d'erosió a les costes rocoses carbonatades de Mallorca***.

L'exposició pública de la tesi tengué lloc el 15 de juny de 2006 a la sala de juntes de l'edifici Mateu Orfila de la Universitat de les Illes Balears. El tribunal d'integraren científics de reconegut prestigi en els camps de la geomorfologia litoral, la biogeografia i l'estudi del karst. Presidí el tribunal el Dr. Vicenç Maria Rosselló Verger (Catedràtic de Geografia Física de la Universitat de València, membre de l'Institut d'Estudis Catalans), actuà com secretari el Dr. Antoni Rodríguez-Perea (Professor titular d'Estratigrafia de la Universitat de les Illes Balears) i com a vocals els Drs. Augusto Pérez-Alberti (Catedràtic de Geografia Física de la Universitat de Santiago de Compostela), Josep M. Panareda Clopés (Catedràtic

1 Departament de Ciències de la Terra, Universitat de les Illes Balears, Cra. Valldemossa, km 7.5, 07122 Palma
2 Adreça actual: IMEDEA (CSIC-UIB), Institut Mediterrani d'Estudis Avançats. Miquel Marqués 21, 07190 Esporles
E-mail: lgomez-pujol@uib.es

de Geografia Física de la Universitat de Barcelona, membre de l'Institut d'Estudis Catalans) i Àngel Ginés Gracia (Professor Associat d'Ecologia de la Universitat de les Illes Balears, Museu Balear de Ciències Naturals). La defensa de la tesi obtingué la qualificació d'Excel·lent *cum laude* per unanimitat del tribunal.

De més a més dels exemplars dipositats a la Universitat de les Illes Balears, també és possible consultar les còpies disponibles a la Societat d'Història Natural de les Illes Balears (SHNB) i a la Societat Geogràfica de les Illes Balears (SOGIB).

Estructura i contingut

La memòria de 234 pàgines s'estructura en sis capítols (Taula 1), un de caràcter introductor, quatre de temàtics i un de recapitulació a mode de conclusions. En el primer capítol es revisa quin és l'estat de coneixement de les costes rocoses des de la perspectiva de la geomorfologia dinàmica. Tot posant l'èmfasi en els agents i els processos d'erosió-alteració de les costes rocoses carbonatades. En aquest mateix capítol es repassa les contribucions científiques que tenen per objecte les costes rocoses de Mallorca, així com també s'aborden i consideren tot un seguit de reflexions terminològiques a propòsit de les formes del relleu de les costes rocoses. El segon capítol recull els resultats de diferents experiments que tenen per objecte quantificar les taxes de denudació de la costa rocosa, a la vegada que es contrasten aquests resultats mitjançant l'ús de diferents tècniques instrumentals i tests d'exposició. Un gruix important de la memòria se dedica al paper de la biologia en l'alteració del rocam litoral, en particular de l'acció bioerosiva de gastròpodes com *Patella rustica* i *Melaraphe neritoides*. Així se n'estudien els paràmetres poblacionals, la distribució al llarg dels perfils de les localitats d'estudi i el contingut lític dels seus pèl·lets fecals per tal de quantificar-ne la seva contribució a la destrucció de la costa rocosa. Un quart capítol, projecte les taxes d'erosió obtingudes en els capítols anteriors en un gràfic que interrelaciona els vectors de freqüència i magnitud. Així es reflexiona sobre el paper de les velocitats i els ritmes en el modelat de les costes rocoses. El cinquè i darrer dels capítols temàtics se dedica a l'organització i morfometria d'un tipus de relleu ben característic de les costes rocoses carbonatades: el karren litoral. Es fa un inventari de les formes, de la seva distribució, de les característiques morfomètriques dels cocons, de la importància dels agents d'alteració i el seu abast espacial a partir de l'anàlisi de les nanofomes, així com també se'n proposa un model evolutiu. Val a dir, que tot i que el títol de la tesi fa èmfasi en l'estudi dinàmic de les costes rocoses carbonatades de Mallorca, l'àmbit geogràfic de la tesi ha passat l'illa de Mallorca per contrastar els seus resultats amb les formes de karren litoral de la veïna illa de Menorca sobre roques carbonatades semblants a les del Migjorn i Llevant de Mallorca. Així mateix, s'ha desenvolupat part de l'aproximació experimental sobre rocam no carbonatat a la costa meridional d'Austràlia.

Principals contribucions

La present investigació ha permès derivar tot un seguit de conclusions relatives tant als agents i processos d'erosió i alteració de la costa rocosa carbonatada, com de les formes i evolució del karren litoral. Per aconseguir una exposició més clara, els aspectes més rellevants s'estructuren en cinc apartats, els quals segueixen els pertinents capítols en què s'ha dividit la memòria, per acabar amb un seguit de consideracions de caràcter transversal de tot el contingut de la memòria.

DINÀMICA EROSIVA DE LES COSTES ROCOSES

Els ordres de magnitud i els ritmes de desmantellament que afecten el rocam carbonatat a la costa són aspectes clau per entendre l'organització i l'evolució de les formes del karren litoral. Així doncs, el primer apartat de la memòria persegueix identificar quins són els principals agents que intervenen en el binomi alteració-erosió de les costes rocoses carbonatades i avaluar la possibilitat d'aclarir-ne la contribució en el desmanegament de la costa mitjançant tècniques instrumentals. D'entre altres aspectes, aquells que es considera necessari destacar són els següents:

- S'han assajat diferents tècniques instrumentals per al càlcul del rebaixament de la superfície de la roca sobre diferents textures de roques carbonatades (bretxes i calcarenites): micròmetre de dial mòbil, (TMEM); escàner làser, test d'exposició de roca, i profunditat d'alveolització de superfícies històriques.
- Existeixen una sèrie de problemes de tipus metodològic arran de la capacitat de mostratge espacial i temporal de cada una de les tècniques, la resolució i la naturalesa i significat de les taxes de denudació. Ara per ara, la tècnica instrumental que, per volum de dades, resolució i facilitat en la instal·lació, és més aconsellable per al treball de camp és el micròmetre de dial mòbil. No obstant això, el seu principal entrebanc és el biaix que suposa el fet de treballar amb superfícies més o menys horitzontals, deixant de banda esquerdes i altres superfícies de parets verticals per qüestions tècniques. Per tant, s'han d'entendre les taxes calculades amb el TMEM com els valors mínims de denudació a les zones d'estudi.
- L'escàner làser es presenta com una eina amb força possibilitats per als estudis d'alteració i erosió de la costa rocosa. Ara per ara, però, les dificultats en el transport i la instal·lació en el camp, de més a més de la resolució de registre en la vertical, fan que l'estudi, mitjançant altres tècniques instrumentals, sigui més factible.
- Els tests d'exposició s'han revelat com una tècnica senzilla i econòmica, amb moltes possibilitats per a la caracterització dels patrons d'erosió de les cos-

<p>1. Les costes rocoses: marc teòric i estat de la qüestió</p> <p>1.1. Problemàtica en la definició de la costa</p> <p>1.2. La costa rocosa com a objecte d'estudi</p> <p>1.3. Consideracions terminològiques</p> <p>1.4. Agents i processos en el modelat de les costes rocoses</p> <p>1.5. El paper del rocam i el vector evolutiu</p> <p>1.6. Processos marins vs. subaeris</p> <p>1.7. Objectius de l'estudi i aproximació metodològica</p>
<p>2. Dinàmica erosiva de les costes rocoses</p> <p>2.1. Introducció</p> <p>2.2. Tècniques instrumentals per al càlcul de taxes d'erosió a les costes rocoses</p> <p>2.3. Patrons i taxes d'erosió a costes rocoses calculades mitjançant TMEM: s'Alavern</p> <p>2.4. Patrons i taxes d'erosió a costes rocoses calculades mitjançant TMEM: Marengo</p> <p>2.5. Patrons i taxes d'erosió a la costa rocosa calculades mitjançant escàner làser (LS)</p> <p>2.5. Patrons i taxes d'erosió a la costa rocosa calculades mitjançant tests d'exposició (weight-loss rock tablets)</p> <p>2.5. Patrons i taxes d'erosió a la costa rocosa calculades a partir de la degradació del patrimoni històric: la Torre d'en Beu</p> <p>2.5. Naturalesa i significat de les taxes d'erosió</p>
<p>3. La contribució biològica en l'erosió de la costa rocosa</p> <p>3.1. Introducció</p> <p>3.2. La zonació de les costes rocoses</p> <p>3.3. L'acció bioerosiva a les costes rocoses carbonatades</p> <p>3.4. Patrons i taxes de bioerosió a les costes rocoses de Mallorca</p>
<p>4. Frequència, magnitud i escala en la morfodinàmica de les costes rocoses: s'Alavern com a excusa</p> <p>4.1. Introducció</p> <p>4.2. Taxes de denudació</p> <p>4.3. Taxes de bioerosió</p> <p>4.4. Tests d'exposició de peces de roca</p> <p>4.5. Taxes de desintegració granular de la façana dels penya-segats</p> <p>4.6. Taxes relacionades amb l'acció mecànica de les onades</p> <p>4.7. Moviments de masses</p> <p>4.8. Discussió</p>
<p>5. Formes d'alteració i erosió a les costes rocoses carbonatades</p> <p>5.1. Introducció</p> <p>5.2. Àrea d'estudi</p> <p>5.3. Materials i mètode</p> <p>5.4. Formes i criteris de classificació</p> <p>5.5. Distribució i organització del karren litoral a Mallorca i al Migjorn de Menorca</p> <p>5.6. L'organització de les formes</p> <p>5.7. Observacions mitjançant microscopi electrònic de rastreig (SEM)</p> <p>5.8. Controls en el desenvolupament de karren</p> <p>5.9. Processos, zonació i evolució del karren litoral</p>
<p>6. Conclusions</p>
<p>Bibliografia</p>
<p>Annexos</p>

Taula 1: Índex de la Tesi doctoral

Table 1: PhD thesis contents

tes rocoses. No obstant això, cal no oblidar el reduccionisme que suposa treballar amb roca "fresca" i amb superfícies poc rugoses, netes i sense colonitzar. L'ús de la xarxa de niló permet separar la contribució d'alguns dels processos i agents que hi operen. Encara que considerar que amb els tests d'exposició de peces de roca es pot calcular la contribució de l'alteració química, no deixa de ser reduccionista.

- Les profunditats dels alvèols sobre superfícies datades i els carreus de les torres de defensa del litoral en el nostre cas, també han resultat un indicador força útil tant per tenir un ordre de magnitud

de les taxes de denudació, com per identificar-ne alguns dels patrons espacials. D'aquí la contribució d'agents com l'alteració per sals.

- Prèvia a la interpretació de les dades de les taxes de denudació, les diferents tècniques utilitzades permeten el contrast d'unes amb les altres i avaluen si hi ha diferències importants en la capacitat de mesura. Parell a parell, és a dir, el micròmetre de dial mòbil respecte de l'escàner làser i els tests d'exposició respecte de la profunditat dels alvèols a superfícies datades, les taxes de denudació aboquen resultats complementaris. No hi ha diferències en els ordres de magnitud de les taxes d'ero-

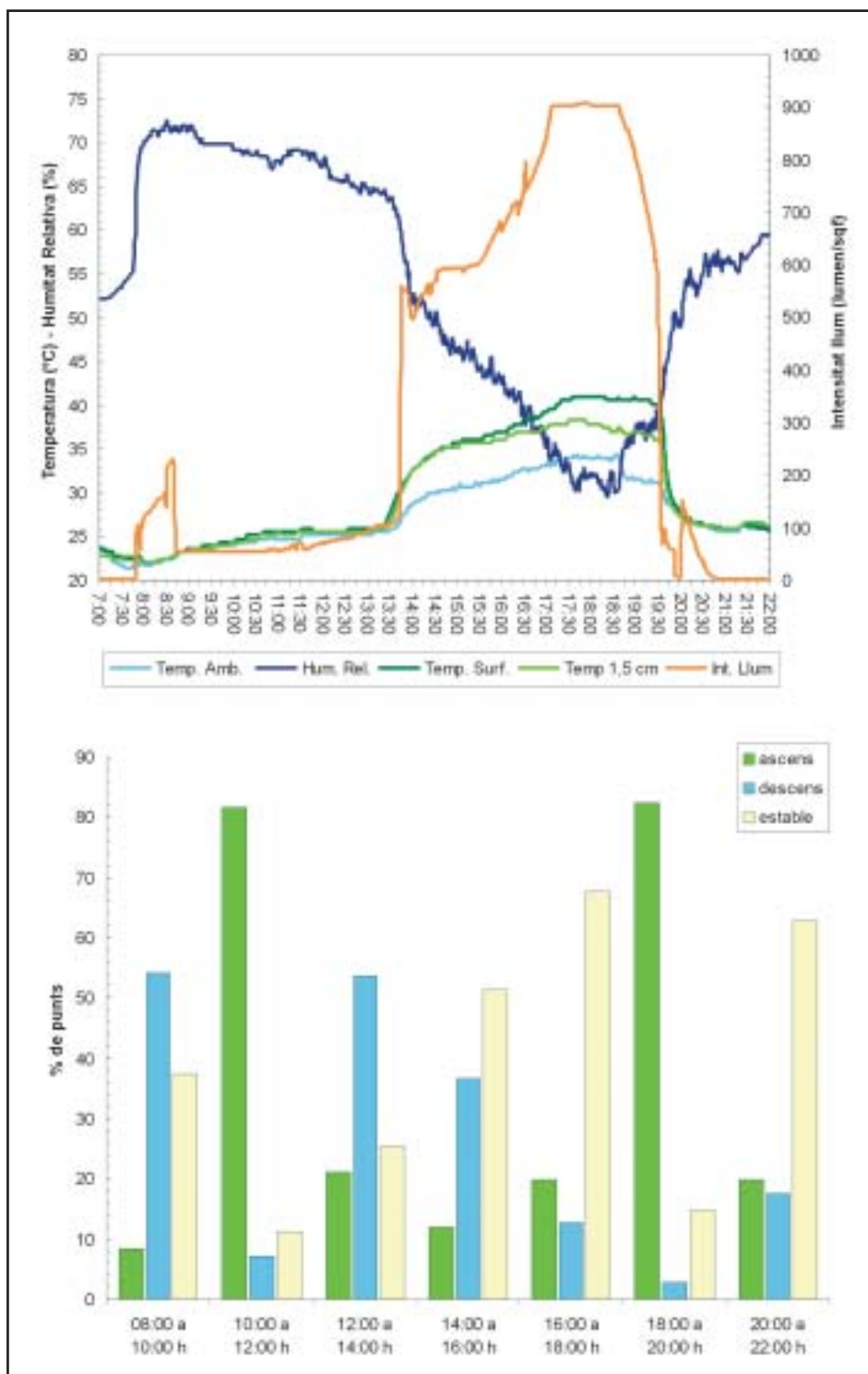


Figura 1: Evolució de les variables ambientals i de microtopografia a l'experiment de 24 h desenvolupat a s'Alavern.

Figure 1: Environmental parameters and microtopography evolutions during the 24 hours monitoring at s'Alavern.

sió, excepció feta d'aquells que es deriven del registre temporal dels aparells, en especial de les taxes de denudació o acreció horàries respecte de les anuals, calculades amb el TMEM. Aquesta circumstància, mentre no hi hagi un desenvolupament tècnic millor, permet considerar amb certa confiança els resultats de cada una de les tècniques. En aquest sentit, i com a precaució, cal posar més èmfasi en els ordres de magnitud que no pas en la taxa d'erosió per ella mateixa.

Patrons i taxes d'erosió calculades amb TMEM

- Per a la localitat d'estudi de s'Alavern, al sud de Mallorca, sobre un rocam de calcarenites del Miocè Superior, a 0,75 m d'alçària respecte del nivell mitjà marí i a 11 m de la línia de costa, s'ha estudiat el rebaixament de quatre superfícies rocoses entre el 18 de maig de 2004 i el 7 de juny de 2005. Les taxes d'erosió de les superfícies estudiades, calculades com a diferència d'altura relativa entre regis-

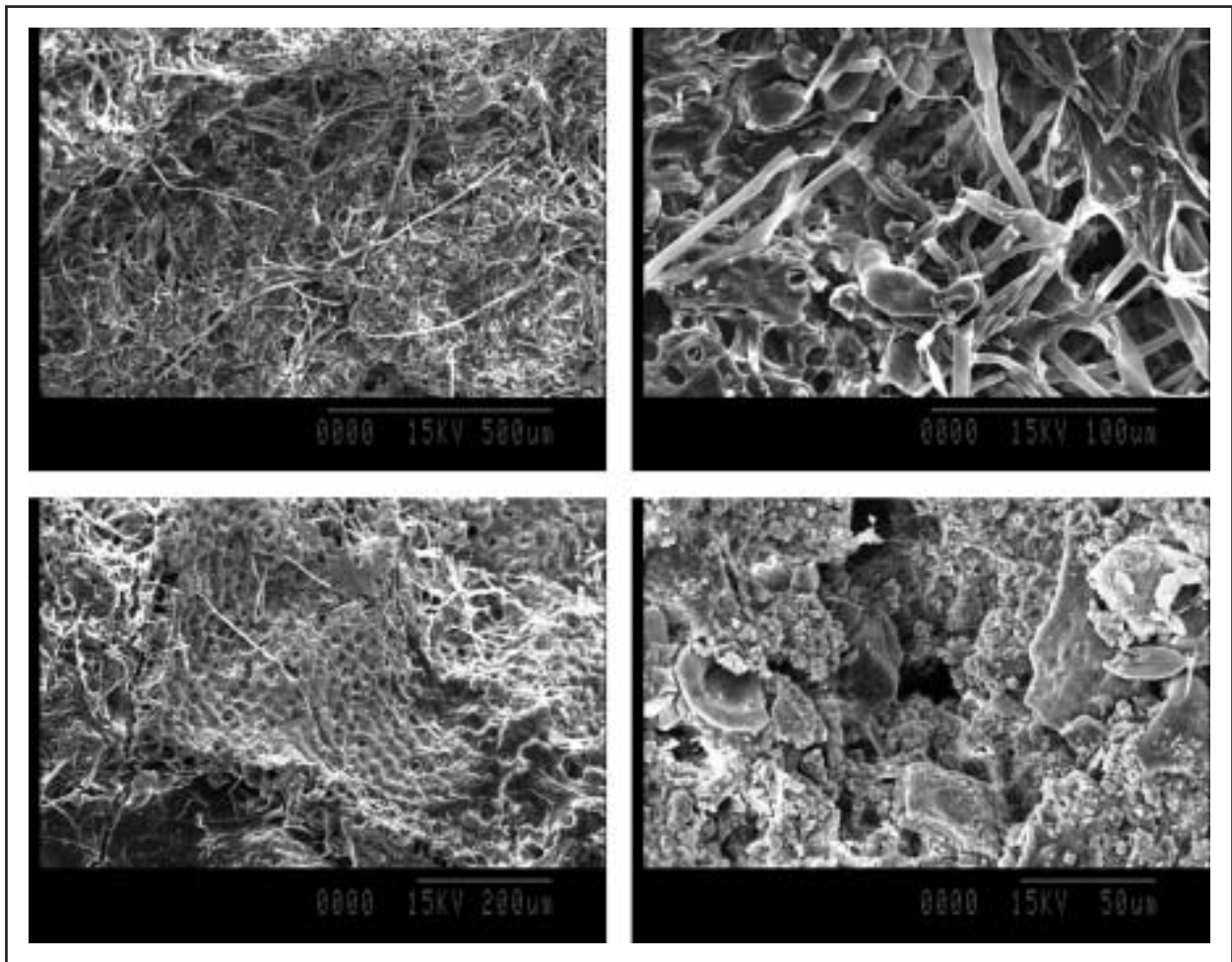


Figura 2: Imatges de microscopi electrònic de rastreig de les superfícies estudiades a s'Alavern on s'hi pot apreciar la important presència de la pàtina biològica i com les hifes i els tal·lus líquenics entapissen la superfície, s'entrellacen amb els grans de la roca i en penetren els buits.

Figure 2: Rock fragments SEM exploration from s'Alavern, note the presence of a biofilm in the rock surface and rock voids.

tres, oscil·la de $-1,819$ a $-0,478$ $\text{mm}\cdot\text{a}^{-1}$. Tot i que també es constata l'existència de punts de la superfície rocosa que experimenten tendències d'ascens amb ràtios de $0,782$ a $1,183$ $\text{mm}\cdot\text{a}^{-1}$ arran del paper dels agents biològics.

- De les quatre superfícies caracteritzades, cada una segueix un patró més o menys diferent, tot i estar localitzades al domini hidrodinàmic del ruixim i mantenir distàncies de poc més de cinc metres d'una a l'altra. Així doncs, mentre que hi ha superfícies que no experimenten canvis significatius en la seva microtopografia (un 81,18% de les cotes romanen a la mateixa posició o per sota de la capacitat de mesura de l'aparell), d'altres experimenten canvis significatius, pel que fa al rebaixament o l'ascens de la microtopografia respecte dels registres inicials. Aquest fet anuncia una important variació espacial quant a l'acció i als processos d'alteració-erosió a les costes rocoses. I això només al domini del ruixim.
- Les taxes d'erosió anuals del TMEM evidencien l'existència d'una tendència d'ascens en els valors

d'altura relativa. Aquest fenomen ha estat identificat per altres autors i es designa com a microbombament de la superfície rocosa (*rock surface swelling*). Suposa un cicle de fluctuació de la superfície rocosa que se superposa a cicles temporals més llargs, de caràcter estacional i anual, d'erosió de substrat.

- S'ha desenvolupat un mostratge horari de les tendències d'ascens i descens de microtopografia de la superfície rocosa a s'Alavern, paral·lelament al control de les variables ambientals de temperatura i humitat i la temperatura en superfície a diferents profunditats de la roca. Canvis de 5°C de temperatura ambiental, 40 punts en la humitat relativa i 1000 $\text{lumen}\cdot\text{m}^{-2}$ són suficients perquè hi hagi variacions d'altura relativa de $-0,303$ mm a $0,355$ mm , respecte de registres previs (Fig. 1).
- Aplicant un algoritme que classifica el comportament de la tendència dels punts entre registres d'altura relativa, s'hi observen tres categories de desplaçament: ascens, descens i estable. La distribució temporal d'aquestes tendències és esbiaixada. Així, durant les hores de màxima insolació domina

la contracció de la superfície rocosa i, quan disminueix la incidència del Sol sobre la roca i augmenta la humitat ambiental, llavors dominen les tendències d'ascens de la roca.

- Els patrons de canvi de la superfície rocosa no són homogenis en termes espacials i contraris a allò que caldria esperar de l'expansió i contracció tèrmica de la roca. Estadísticament, s'ha demostrat que la superfície de la roca té un comportament heterogeni i dinàmic al llarg del dia. De més a més, no existeix una variació significativa entre la composició mineral dels grans de la roca (98,10% carbonats), motiu pel qual tot apunta cap a un control biològic del bombament de la superfície rocosa a la zona d'estudi.
- L'exploració amb el SEM revela l'existència d'una important pàtina biològica amb una densitat de filaments considerable entre els grans de la roca i dins els seus buits. La fisiologia de les hifes dels fongs i dels líquens, d'acord amb la bibliografia, pot explicar els episodis d'ascens i de descens, així com les magnituds de la superfície de la roca (Fig. 2).
- Així doncs, el bombament de la superfície de la roca s'interpreta com un fenomen biogemorfològic, que contribueix a la fatiga de la làmina superficial (primers mil·límetres) de la roca, a la vegada que la debilita, alliberant-ne els grans, i afavoreix el rentat o l'acció de les onades durant les tempestes.
- El control biològic del fenomen de bombament de la superfície rocosa, a ambients supralitorals i en el domini del ruixim, també s'ha constatat instrumentalment sobre superfícies de roca, la naturalesa de les quals és completament diferent respecte de les de Mallorca. Així, a Marengo (Victòria, Austràlia), amb un substrat de gresos arcòsics, canvis de 5°C en la temperatura i 40 punts en la humitat ambiental poden implicar canvis en la microtopografia entre registres horaris de -0,126 a 0,261 mm.

Patrons i taxes d'erosió calculades amb escàner làser

- Les taxes d'erosió, calculades a partir de la superposició de microtopografies obtingudes amb l'escàner làser, oscil·len entre un rebaixament mínim de 0,103 mm·a⁻¹ i un màxim d'1,234 mm·a⁻¹. La microcartografia de les diferències posa de manifest que l'erosió de les superfícies es concentra en uns pocs punts, de la mateixa manera que, en funció de la naturalesa de la roca, hi ha un biaix considerable en la magnitud de la taxa d'erosió. En aquest sentit, tot i la duresa respecte d'altres substrats, les superfícies sobre les bretxes de la Cala d'en Guixar tenen taxes d'erosió majors, perquè quan bota un gra les seves dimensions impliquen un volum més important que no a les calcarenites del Miocè Superior.
- Amb independència de la litologia, es constata una diferència del rebaixament de la superfície entre les

microtopografies obtingudes al domini hidrodinàmic dels esquits i les que s'ubiquen al domini del ruixim. D'una a l'altra hi ha prop de 3 dècimes de mil·límetre de diferència. A s'Alavern, la zona d'esquits registra un descens de 0,103 i la de ruixim de 0,411 mm·a⁻¹. A la Punta des Sivinar l'interval és de 0,514 a 0,960 mm·a⁻¹. Aquest fet implica un patró oposat a l'energia i a l'acció de les onades a les costes rocoses. A la vegada, es deixa entreveure la importància dels processos subaeris i biològics (bombament de la superfície de la roca) al llarg del perfil.

Patrons i taxes d'erosió calculades amb tests d'exposició de peces de roca

- S'han dut a terme dos experiments de tests d'exposició de peces de roca a dues localitats, amb dues litologies diferents. A s'Alavern, amb peces de roca de biocalcarenites del Miocè Superior, s'hi han registrat taxes d'erosió mitjanes de 0,250 mm·a⁻¹, amb mínims de 0,004 mm·a⁻¹ i màxims de 0,766 mm·a⁻¹. A la Punta des Bauç, amb peces de roca d'eolianita quaternària, els valors mitjans d'erosió són de 0,950 mm·a⁻¹ amb un rang que abraça des de mínims de 0,380 mm·a⁻¹ a màxims de 2,100 mm·a⁻¹.
- El mostratge espacial a ambdues localitats permet constatar l'existència d'un gradient espacial, que s'atribueix a l'acció conjunta de l'alteració per sals, la bioerosió i també la dissolució inorgànica. Aquest gradient disminueix de mar cap a terra, de manera que les taxes mitjanes entre les mostres més properes al nivell marí mitjà i les de posicions més terrestres són d'ordre de quatre a sis cops majors.
- El gradient identificat amb els tests d'exposició de roca no concorda amb els patrons que es deriven de l'escàner làser. Entre d'altres raons, cal considerar, d'una banda, la naturalesa i el procediment d'allò que es mesura i, de l'altra, el mostratge espacial. Les peces de roca no tenen una colonització biològica tan important com les de la superfície de les localitats d'estudi, i la microrugositat és força menor. En aquest sentit hi ha un grau d'artificialització respecte de la situació real.

Patrons i taxes d'erosió calculades a partir de l'alveolització del patrimoni històric

- Finalment, a partir de l'estudi de l'alveolització dels contraforts de marès de la Torre d'en Beu, s'hi ha identificat un gradient d'alteració que accentua l'alteració i l'erosió dels contraforts orientats en la direcció d'arribada dels vents i de les onades dominants. La presència de sals i guixos a l'interior dels alvèols fa que les taxes d'erosió calculades, de 0,011 a 0,339 mm·a⁻¹, s'atribueixin principalment a l'acció de l'alteració per sals, ajudada per la dissolució inorgànica.

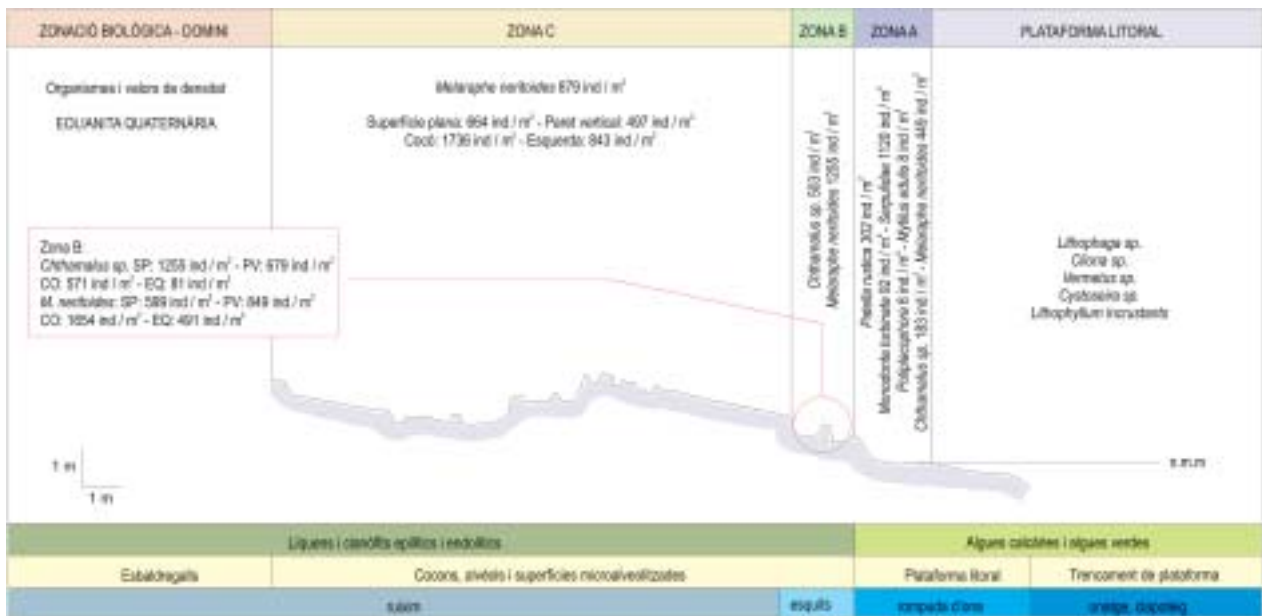


Figura 3: Zonació biològica del perfil de costa estudiats sobre eolianites a la Cala d'en Guixar

Figure 3: Biological zonation on a aeolianite profile at Cala d'en Guixar.

- Les taxes mitjanes d'erosió, calculades a partir de les profunditats d'alveolització, ($0,328 \text{ mm}\cdot\text{a}^{-1}$) a carreus de marès, concorden amb els valors dels tests d'exposició de peces de roca ($0,350 \text{ mm}\cdot\text{a}^{-1}$), per a les mostres ubicades als dispositius més terrestres del mostratge amb peces de roca d'eolianites quaternàries a la Punta des Bauç.

LA CONTRIBUTIÓ BIOLÒGICA EN L'EROSIÓ DE LA COSTA ROCOSA

La contribució biològica, bé com a factor genètic, bé com a condicionant, en el karren litoral és un dels aspectes en els quals les investigacions més recents hi posen l'èmfasi. Són molts i ben diversos els mecanismes per les quals els organismes adquireixen protagonisme en el desenvolupament del microrelleu calcari al litoral. El segon apartat, doncs, persegueix delimitar quin és el paper de la contribució biològica en l'erosió de la costa rocosa. En aquest sentit, s'ha dut a terme l'inventari de les espècies de macroorganismes presents a les costes rocoses de Mallorca i s'ha quantificat l'erosió que se'n deriva.

- Els principals macroorganismes bioerosius de les costes rocoses de Mallorca són els gastròpodes *Patella rustica*, *Patella caerulea*, *Patella ullysi-pensis*, *Monodonta turbinata*, *Monodonta articulata*, *Chiton Olivaceous*, *Lepidochitona corrugata*, *Melaraphe neritoides*, *Melaraphe punctata* i els equinoderms *Arbacia lixula* i *Paracentrotus lividus*. També cal posar de manifest que, amb un comportament dual, atès que tant poden efectuar una acció de protecció, com afavorir l'erosió, destaquen per l'acció de protecció que exerceixen sobre les costes rocoses de Mallorca els bioherms de *Chthamalus stellatus*, *Chthamalus depressus* i *Mytilus edulis*.

També hi desenvolupen una funció de protecció el conjunt de macroalgues del grup de *Cystoseira* sp., així com el conjunt de vermètds i algues incrustants calcàries que constitueixen el *trottoir* que es disposa sobre la plataforma litoral o a mode de balda adossada a la paret del penya-segat.

- La presència dels organismes no és homogènia al llarg del perfil. Se'n poden diferenciar tres zones en funció de les abundàncies relatives. La primera (Zona A) correspon a l'extensió on les pegellides són l'organisme més representatiu, especialment *Patella rustica*. Aquesta zona coincideix amb les parets verticals que segueixen la plataforma litoral en avançar cap al segment terrestre del perfil de costa. També hi són presents individus, tot i que amb menor importància, de *Monodonta turbinata*, *Mytilus edulis*, *Melaraphe neritoides* i, ocasionalment hi apareixen els polioplacòfors. La segona de les zones (Zona B) ve definida per la presència dels cirrípedes *Chthamalus stellatus* i *Chthamalus depressus*, especialment a esquerdes i a superfícies d'impacte de l'onatge. El tercer domini (Zona C), que coincideix amb l'abast del ruixim, es correspon amb la presència quasi exclusiva de *Melaraphe neritoides* i, puntualment, de *Melaraphe punctata* (Fig.3).
- L'anàlisi estadística posa de manifest l'existència d'un control del substrat (litologia i heretatge) i un altre d'hidrodinàmic sobre la distribució dels organismes en el perfil de costa. La forma del perfil (és a dir, el paper de la fracturació, el modelat del perfil) explica quasi bé un 32% de la variabilitat de la distribució de la biomassa –presència dels individus i les densitats– al qual s'afegeix un 25% del resultat de la combinació entre exposició dels perfils i litologia. Així, els perfils exposats tendeixen a pre-

sentar un nombre major d'espècies i una colonització més important a les zones baixes del perfil. Als perfils més arcerats, les densitats majors i el factor de biomassa s'accentuen en els segments més terrestres.

- Explicacions tan baixes de la variabilitat, poden estar relacionades amb la distribució a mode de pegats dels organismes, que es concentren preferentment a esquerdes i a depressions respecte de superfícies planes. Aquest patró coincidiria amb la distribució del factor nutrients –cianòfits– que, a mode de pegat, cobreix la roca.
- S'ha quantificat la capacitat erosiva i les taxes d'erosió de *Patella rustica* i *Melaraphe neritoides*, atès que són els dos organismes més abundants en els perfils estudiats. Per a *Patella rustica*, les capacitats erosives fluctuen entre 7,81 i 11,41 g·ind⁻¹·dia⁻¹, amb taxes d'erosió de 0,324 a 2,095 mm·a⁻¹. Per a aquest gastròpode, el paper de la litologia, com a control de l'erosió, no és tan transcendent com altres variables de caràcter biològic i ecològic (estructura de la població, competència per l'aliment, importància dels biofilms i els cianòfits que consumeixen). Per a *Melaraphe neritoides*, la capacitat erosiva té valors mínims de 0,013 g·ind⁻¹·dia⁻¹ i màxims de 0,099 g·ind⁻¹·dia⁻¹. Les taxes d'erosió oscil·len de 0,008 a 0,510 mm·a⁻¹ tot i que la variabilitat entre localitats d'estudi i zonacions biològiques del perfil és considerable. Els valors de les taxes acostumen a ser majors a la zona B del perfil. La capacitat erosiva de *Melaraphe neritoides* augmenta amb l'edat i les dimensions dels individus, per la qual cosa acostumen a ser majors els valors de la zona C respecte de les altres zones. S'identifica un control de la litologia en la capacitat bioerosiva de *Melaraphe neritoides*. Pel que fa a les taxes de bioerosió, de més a més del control litològic, també depenen dels paràmetres

ecològics que en determinen el volum i les dimensions de les poblacions.

- Per a les costes rocoses de Mallorca, l'agent bioerosiu més important és *Patella rustica* amb valors mitjans d'erosió de 0,60 mm·a⁻¹.
- La capacitat bioerosiva de *Melaraphe neritoides* és deu cops menor, un ordre de magnitud, que les de *Patella*. Per a *Patella rustica*, tot i que les característiques de textura, duresa i porositat de la roca juguen un paper important, altres factors de caràcter biològic i ecològic poden explicar millor les variacions en la capacitat bioerosiva i les taxes d'erosió. En canvi, per a *Melaraphe neritoides*, amb valors mitjans de taxa d'erosió de 0,010 mm·a⁻¹, també se'n pot apreciar el control biològic i ecològic, tot i que es fa més palesa la incidència del rocam en els patrons i les taxes d'erosió d'aquests organismes (Taula 2 i 3).
- Es constata la importància de la distribució dels cianòfits en les taxes de bioerosió, motiu pel qual, de cara a futurs estudis, es fa necessari tenir-ne un coneixement sòlid per poder explicar i justificar les taxes de bioerosió dels organismes brostejadors.

FREQÜÈNCIA, MAGNITUD I ESCALA EN LA MORFODINÀMICA DE LES COSTES ROCOSES

El tercer apartat es dedica a integrar la informació disponible a l'entorn de l'erosió de la costa rocosa a la localitat de s'Alavern, per tal d'assajar-ne l'encaix, de les taxes obtingudes, la naturalesa i el significat.

- A la costa de s'Alavern, s'hi han quantificat dos grups de processos erosius d'acord amb els patrons temporals i la magnitud de la seva acció. L'erosió relacionada amb l'acció biològica, l'altera-

<i>Patella rustica</i>	Perfil	Zona	δ roca	Capacitat bioerosiva (g·ind ⁻¹ ·a ⁻¹)					Taxa mitjana de bioerosió (mm·a ⁻¹)				
				Prim	Est	Tard	Hiv	Total	Prim	Est	Tard	Hiv	Total
CG	1	A	2,60	1,558	1,291	1,200	1,604	8,253	0,500	0,200	0,288	0,396	0,346
	2	A	2,60	1,558	1,291	1,200	1,604	8,253	0,284	0,656	0,328	0,112	0,345
	3	A	2,60	1,558	1,291	1,200	1,604	8,253	0,420	0,316	0,272	0,284	0,324
	4	A	2,06	1,558	1,291	1,200	1,604	8,253	1,740	0,992	0,504	0,752	0,997
	5	A	2,60	1,558	1,291	1,200	1,604	8,253	1,628	0,280	0,172	0,216	0,730
	6	A	2,06	1,558	1,291	1,200	1,604	8,253	0,888	0,076	0,216	0,272	0,363
SA	1	A	2,40	1,398	1,170	1,905	1,414	8,287	0,428	0,296	0,400	0,352	0,369
PS	1	A	2,45	2,771	1,704	1,345	1,706	9,976	6,240	1,164	0,668	0,312	2,095
CM	1	A	2,12	2,169	1,753	2,200	3,171	11,413	0,656	0,628	0,640	0,700	0,656
	2	A	2,12	2,169	1,753	2,200	3,171	11,413	0,712	0,716	0,656	1,172	0,814
PF	1	A	2,35	1,509	1,785	–	2,166	7,810	0,752	0,476	–	0,696	0,482
	2	A	2,35	1,509	1,785	–	2,166	7,810	1,652	1,920	–	0,520	1,023

Taula 2: Taxes de bioerosió *Patella rustica*. CG: Cala d'En Guixar; SA: S'Alavern; PS: Punta des Sivinar; CM: Cala Murada; PF: Punta des Faralló

Table 2: *Patella rustica* bioerosions rates

Perfil	Zona	Densitat roca	RESIDU LÍTIC PÈL-LETS (g·ind-1·estació-1)				Total (g·ind-1·a-1)	TAXA MITJANA D'EROSIÓ (mm·a-1)				Taxa anual
		(g·cm-3)	Primaver.	Estiu	Tardor	Hivern		Primaver.	Estiu	Tardor	Hivern	
CALA D'EN GUIXAR												
1	A	2,60	0,005	0,004	0,015	0,004	0,028	0,0076	0,0020	0,0200	0,0036	0,0083
	B	2,60	0,007	0,016	0,008	0,003	0,034	0,0060	0,0144	0,0076	0,0028	0,0077
	C	2,60	0,022	0,004	0,005	0,003	0,034	0,0072	0,0012	0,0012	0,0024	0,0030
2	A	2,60	0,005	0,004	0,015	0,004	0,028	0,0048	0,0020	0,0116	0,0028	0,0053
	B	2,60	0,007	0,016	0,008	0,003	0,034	0,0080	0,0160	0,0124	0,0040	0,0100
	C	2,60	0,022	0,004	0,005	0,003	0,034	0,1200	0,0020	0,0032	0,0012	0,0047
3	A	2,60	0,005	0,004	0,015	0,004	0,028	0,0016	0,0032	0,0120	0,0028	0,0048
	B	2,60	0,007	0,016	0,008	0,003	0,034	0,0044	0,0060	0,0124	0,0024	0,0062
	C	2,60	0,022	0,004	0,005	0,003	0,034	0,0068	0,0004	0,0020	0,0004	0,0025
4	A	2,06	0,005	0,004	0,015	0,004	0,028	0,0024	0,0048	0,1880	0,0032	0,0073
	B	2,06	0,007	0,016	0,008	0,003	0,034	0,0068	0,0596	0,0164	0,0096	0,0231
	C	2,06	0,022	0,004	0,005	0,003	0,034	0,0356	0,0108	0,0064	0,0044	0,0143
5	A	2,60	0,005	0,004	0,015	0,004	0,028	0,0068	0,0092	0,0136	0,0028	0,0081
	B	2,60	0,070	0,016	0,008	0,003	0,097	0,0164	0,0132	0,0160	0,0024	0,0120
	C	2,60	0,022	0,004	0,005	0,003	0,034	0,0180	0,0008	0,0024	0,0008	0,0056
6	A	2,06	0,005	0,004	0,015	0,004	0,028	0,0064	0,0040	0,0068	0,0164	0,0083
	B	2,06	7,000	0,016	0,008	0,003	7,027	0,0404	0,0444	0,0356	0,0060	0,0317
	C	2,06	0,022	0,040	0,005	0,030	0,097	0,0356	0,0056	0,0076	0,0064	0,0139
CALA MURADA												
1	A	2,12	0,006	0,000	0,003	0,004	0,013	0,0060	0,0000	0,0036	0,0040	0,0035
	B	2,12	0,003	0,003	0,004	0,004	0,014	0,0104	0,0080	0,0056	0,0064	0,0076
	C	2,12	0,050	0,002	0,005	0,004	0,061	0,0044	0,0024	0,0068	0,0040	0,0045
2	A	2,12	0,006	0,000	0,003	0,004	0,013	0,0052	0,0000	0,0008	0,0008	0,0016
	B	2,12	0,003	0,003	0,004	0,004	0,014	0,0048	0,0020	0,0048	0,0060	0,0044
	C	2,12	0,005	0,002	0,050	0,004	0,061	0,0016	0,0012	0,0060	0,0036	0,0031
PUNTA DES SIVINAR												
1	A	2,45	0,016	0,004	0,002	0,003	0,025	0,0348	0,0032	0,0012	0,0012	0,0101
	B	2,45	0,004	0,002	0,008	0,002	0,016	0,0048	0,0016	0,0048	0,0008	0,0030
	C	2,45	0,028	0,002	0,008	0,003	0,041	0,0160	0,0008	0,0028	0,0008	0,5100
PUNTA DES FARALLÓ												
1	A	2,35	0,004	0,005	0,003	0,004	0,016	0,0028	0,0072	0,0084	0,0240	0,0052
	B	2,35	0,006	0,019	0,004	0,070	0,099	0,0212	0,0792	0,0140	0,0224	0,0342
	C	2,35	0,003	0,008	0,008	0,006	0,025	0,0036	0,0032	0,0068	0,0036	0,0043
2	A	2,35	0,006	0,019	0,004	0,007	0,036	0,0004	0,0028	0,0028	0,0028	0,0022
	B	2,35	0,003	0,008	0,008	0,006	0,025	0,0012	0,0028	0,0012	0,0044	0,0024
S'ALAVERN												
1	A	2,40	0,003	0,030	0,002	0,003	0,038	0,0008	0,0008	0,0004	0,0008	0,0008
	B	2,40	0,004	0,003	0,003	0,004	0,014	0,0116	0,0076	0,0076	0,0076	0,0085
	C	2,40	0,003	0,001	0,003	0,067	0,074	0,0016	0,0004	0,0020	0,0388	0,0106

Taula 3: Taxes de bioerosió *Melaraphe neritoides*

Table 3: *Melaraphe neritoides* bioerosions rates

ció fisicoquímica i la desintegració granular de les façanes dels penya-segats oscil·len entre la centèsima del mil·límetre i el mil·límetre anual de denudació, i actuen d'una forma contínua en una escala temporal diària o mensual. En canvi, l'erosió quantificada a partir dels moviments de masses o l'acció hidràulica de l'onatge, tot i implicar ordres de magnitud força majors que els descrits anteriorment (de l'ordre de deu i cent vegades majors), no tenen un abast temporal tan continu i el comportament és més episòdic.

- La representació sobre els eixos de freqüència (escala temporal operativa) i magnitud (volum) de cada un dels grups de dades permet traçar un vector negatiu, des de les taxes de denudació freqüents i poc importants, fins a les taxes de denudació de processos poc freqüents, però molt importants (Fig. 4). Aquest vector serveix com a excusa per relacionar les aproximacions dinàmiques amb les evolutives en l'estudi de la geomorfologia de les costes rocoses. Si es considera l'estudi de les costes rocoses des d'un punt de vista dinàmic, posant èmfasi en la quantificació instrumental, llavors aquells agents i processos que destaquen en la morfodinàmica de les costes rocoses són els que operen en intervals de temps curts i continus, com

l'alteració per sals, la bioerosió... En canvi, si l'aproximació és de caràcter evolutiu, i s'hi consideren els esdeveniments més dilatats en el temps, tot i que posen en moviment grans volums de masses, llavors els moviments de masses o l'arrabassament per l'acció hidràulica són els processos claus. En certa manera, aquest vector posa en entredit el debat nominal entre la preponderància dels processos marins vs. els terrestres, o bé la dicotomia alteració-acció de les onades en l'estudi de les costes rocoses. De fet, el pes relatiu de cada un dels elements dels binomis dependrà de la posició de l'investigador en aquest vector. En aquest sentit, és necessari acotar l'escala temporal i espacial en la qual es fa feina a l'hora de decantar-se pel paper d'uns o altres processos, sense oblidar les relacions i la influència dels uns amb els altres.

- A la zona d'atac de l'onatge i acció dels esquits, la bioerosió de *Patella sp.* assoleix taxes semblants a les dels tests d'exposició de peces de roca (0,369 i 0,495 mm·a⁻¹), o a les de denudació del rocam calculades mitjançant l'escàner làser (0,310 mm·a⁻¹). Les taxes mitjanes de rebaixament de la roca a la zona afectada pel ruixim són en alguns casos, prou baixes com per ser iguals que les taxes d'erosió de *Melaraphe neritoides*, mentre que en altres casos

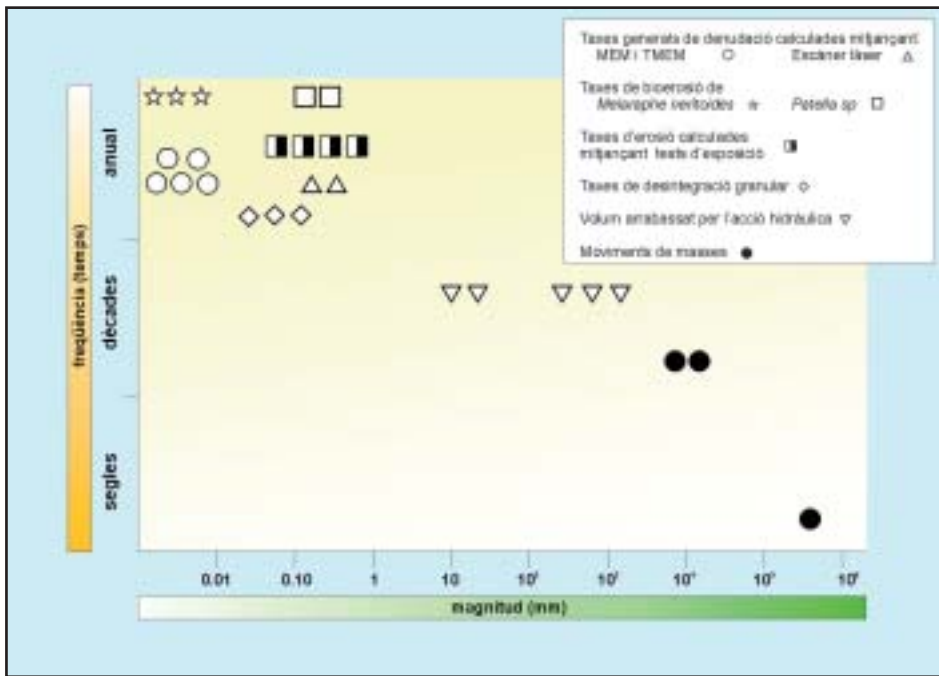


Figura 4: Freqüència, magnitud i escala en la morfodinàmica de les costes rocoses

Figure 4: Frequency, magnitude and scale in the rock coast morphodynamics.

són força majors. D'altra banda, els valors de desintegració granular es corresponen amb els intervals de les taxes d'erosió calculades amb els tests d'exposició de peces de roca. A s'Alavern, les diferents tècniques utilitzades posen de manifest la necessitat de gestionar les taxes obtingudes amb certa cura, i de considerar més l'ordre de magnitud de la taxa d'erosió que no el valor per ell mateix. Dit d'una altra manera, tenim força informació respecte la importància dels diferents agents d'erosió i alteració al llarg del perfil de costa per separat. Integrar les dades resulta, com a mínim, arriscat perquè el mostratge espacial no és prou extens ni complet en el temps, així com les tècniques instrumentals no permeten una avaluació senzilla del que passa a les parets verticals de la costa, on es troba la major concentració d'organismes.

FORMES D'ALTERACIÓ I EROSIÓ A LES COSTES ROCOSES CARBONATADES: EL KARREN LITORAL

El quart apartat recull un inventari de les formes d'alteració i erosió presents a les costes rocoses de Mallorca i Menorca. En considera l'organització i la gènesi de les formes i n'estudia diferents aspectes a diferents escales. De tot plegat, en resulten les següents consideracions:

- Per **karren litoral** s'entén tot aquell seguit de formes d'alteració que es desenvolupen sobre la roca calcària als ambients litorals i en les quals la dissolució juga un paper important. Queden fora d'aquesta definició, entre d'altres, formes com les marmites, les plataformes litorals o les construccions organògenes. Totes elles, tan estretament lligades als ambients que es consideren.

- El **karren litoral** presenta una organització i una gradació interna molt acusada. La gradació de les formes, la fauna i la flora és una de les característiques més destriables de les costes rocoses que està associada al grau d'humidificació, derivat de l'onatge, i a la forma del perfil de costa.
- En termes d'abundància relativa de les formes s'ha dividit cada un dels perfils en cinc mòduls (Fig. 5):

La **plataforma litoral** és el primer mòdul, és una superfície subhoritzontal de 2 a 12 m d'amplària, entapissada per algues calcàries, vermèdids i mates de macroalgues del grup de la *Cystoseira*. Formes com marmites i alvèols, lligats a l'activitat biològica dels bogamarins, en són característiques.

El segon dels mòduls, la **zona α** , coincideix amb l'abast de la rompuda de l'onatge sobre el perfil de costa. Aquest abraça des de la part superior del *notch* o de l'esglaó, fins allà on arriben els esquits amb major intensitat. Hi són presents, amb caràcter dominant, els pinacles amb tot el reguitzell de microalvèols superposats. El color de la superfície de la roca és fosc, arran de la intensa colonització per cianòfits i líquens (*Rivularia* sp., *Pynerocollema* sp.). Hi comencen a aparèixer els primers individus de *Melaraphe neritoides* o *Melaraphe punctata*. Les pegellides (*Patella rustica* i *P. caerulea*) són relativament abundants a les superfícies horitzontals entre pinacles, o bé a les parets verticals. Les esquerdes i fractures eixamplades, que apareixen a la zona α , acostumen a estar intensament colonitzades per crustacis filtradors (*Chthamalus depressus* i *Chthamalus stellatus*). La superfície de la roca és rugosa i durant els episodis secs queda coberta d'eflorescències salines.

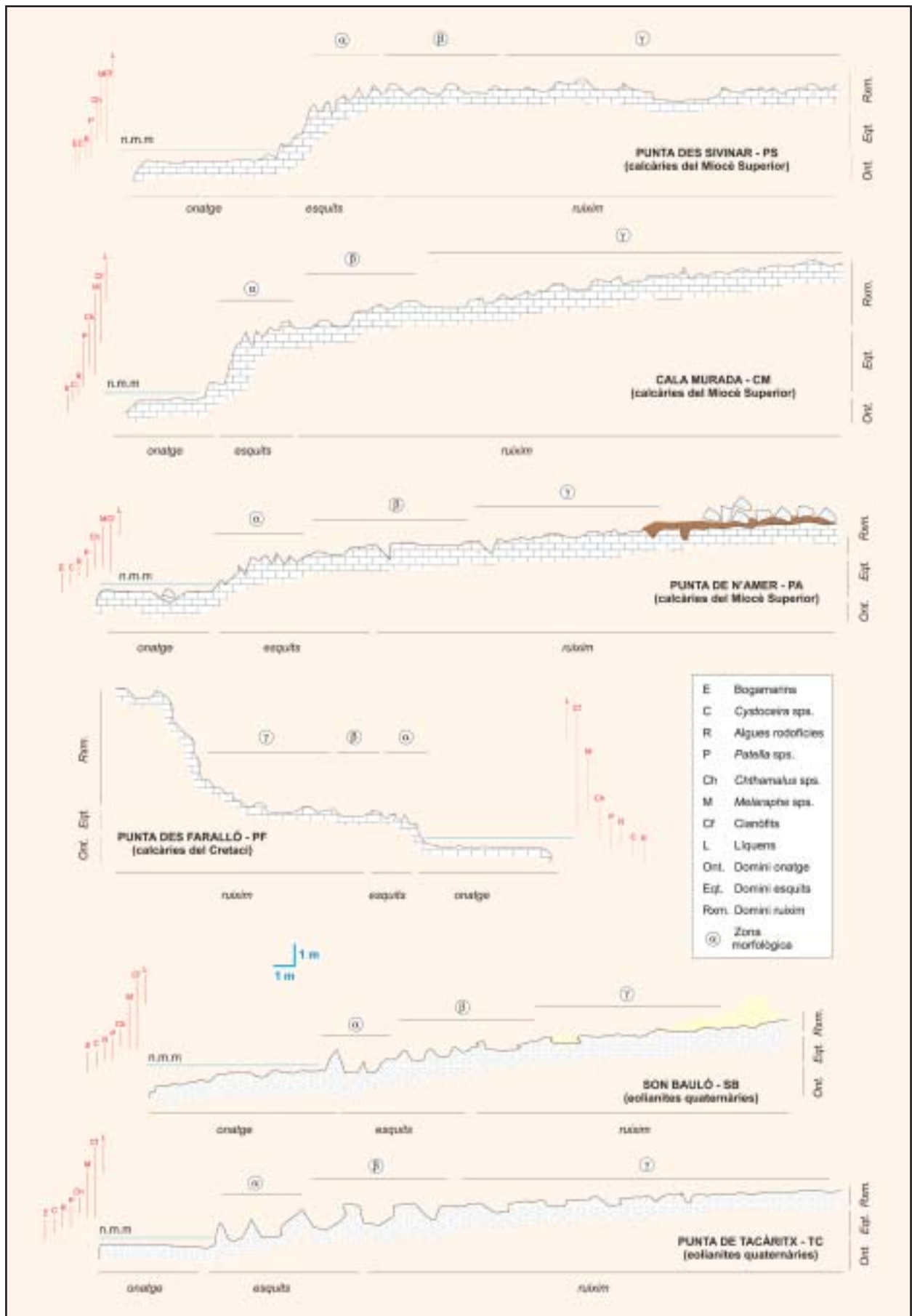


Figura 5: Zonació del karren litoral a diferents zones d'estudi

Figure 5: Coastal karren zonation at study sites.

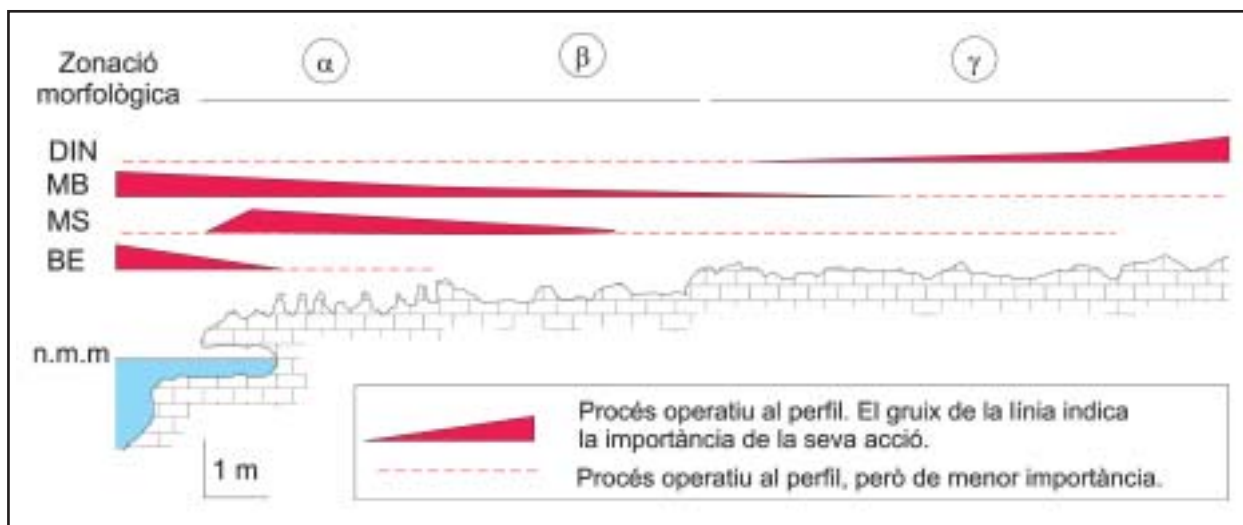


Figura 6: Abast espacial dels processos actius als perfils amb karren litoral de Mallorca i Menorca, d'acord amb les observacions de microscopi electrònic de rastreig (SEM) i la zonació morfològica. DIN: Dissolució inorgànica, MB: Meteorització biològica o induïda pels organismes, MS: Meteorització per sals, BE: Bioerosió.

Figure 6: Agents and processes in coastal karren according to morphological zonation and SEM observations: DIN: solution, MB: biological weathering; MS: salt weathering; BE: bioerosion.

Coincidint amb la zona més intensa d'esquits, hi tenim el tercer mòdul (**zona β**). Hi apareixen els pinacles, en alguns casos amb les seves unides per petites crestes, tot i que la forma dominant són els cocons. En aquesta zona, els cocons mostren un alt grau de connexió, del 70% al 90% dels casos, i la majoria presenten sobreploms.

Ja dins els dominis del ruixim (**zona γ**), quan l'aportació de l'aigua de mar ve en forma d'aerosol, els cocons continuen essent les formes més característiques. Aquest cop, però, es troben aïllats els uns dels altres (entre el 35% i el 100% de les observacions), i en pocs casos presenten sobreploms. Les superfícies entre cocons estan microalveolitzades, tot i que, com passa amb la cobertura de cianòfits, la densitat de microalvèols disminueix terra endins. Comencen a aparèixer alguns líquens crustacis a la superfície de la roca i el gastròpode *Melaraphe neritoides* assolix densitats importants. En aquesta zona del perfil, s'hi poden localitzar microsolcs quan apareixen pegats de roca de textura fina i homogènia, així com conductes de subsòl desenterrats i lleugerament remanegats.

Rere el domini del ruixim, allà on l'acció dels processos marins és més confosa (**zona α**), encara s'hi troben alguns cocons aïllats d'aspecte suau, amb parets i fons arrodonits. Es pot apreciar sobre les superfícies subhorizontals tot un seguit de formes lineals controlades per la fracturació. La superfície entre cocons és menys rugosa que en el mòdul anterior i arriben a donar-se aparences suaus o arrodonides quan els líquens hi són presents (especialment *Verrucaria* sp.). Els microsolcs hi apareixen de forma intermitent, quan la textura de la roca ho permet. Es pot avaluar la transició dels conductes de subsòl a formes del karren litoral.

- L'estudi de les nanoformes, a partir de les imatges de SEM, indiquen l'existència d'un gradient en el qual s'identifica el domini dels processos responsables del desenvolupament del microrelleu a les costes rocoses carbonatades. A la zona de pinacles –zona α– hi destaca la importància de l'acció de les sals i l'erosió i alteració biològiques. Aquestes s'atenuen al domini dels cocons –zona β– i comencen a cedir representativitat a la dissolució per processos inorgànics un cop que s'avança en la component terrestre del perfil.
- S'identifiquen diferents controls sobre el modelat del karren litoral en funció de l'escala. A macroescala es fa palès el control estructural i la fracturació, així com la influència de la història geològica pel que fa a la forma del perfil. També en aquest ordre de magnitud és important la litologia. A mesoescala, l'exposició del perfil i l'abast del domini hidrodinàmic juntament amb la textura i les fàcies de la roca determinen el segon grup de condicionants d'aquest tipus de microrelleu. A microescala, la component biològica i la seva acció tenen un pes transcendent, tant en la gènesi de les formes, com en el control de l'erosió i l'evolució del perfil de costa.
- Un mínim de quatre vectors d'alteració i/o d'erosió poden diferenciar-se sobre els sistemes del karren litoral, en funció de la distribució de les formes (a meso, micro i nanoescala) i del control de l'estructura, la història geològica i el gradient hidrodinàmic (Fig. 6). El primer vector es correspon a la dissolució entesa com a procés estrictament inorgànic. Aquesta component disminueix de terra cap a mar i té la seva expressió més important en els conductes de subsòl exhumats i en algunes depressions de subsòl que, un cop retreballades, passa-

ran a funcionar com a cocons. La dissolució inorgànica és especialment important a la zona ω i en menor mesura a la zona γ . L'alteració biològica o la dissolució bioinduïda és el segon vector i el procés d'alteració més important en el *karren* litoral, bé pel control de l'agressivitat de l'aigua retinguda als cocons, bé per l'atac químic directe sobre la roca de cianòfits i organismes brostejadors. Aquest vector és especialment important a les zones morfològiques α i β . A la zona γ disminueix. En aquesta mateixa línia, el tercer vector considera l'acció bioerosiva desenvolupada pels organismes brostejadors que, en termes absoluts, és transcendental a la plataforma litoral i a la zona α , que disminueix progressivament terra endins. Finalment, el quart vector, l'alteració per sals, juntament amb l'acció mecànica de l'aigua, són importants a la zona α i disminueixen progressivament d'acord amb l'extensió dels dominis hidrodinàmics dels esquits i del ruixim.

- Els pinacles i el seu desenvolupament són una forma que resulta del desmantellament dels cocons. De fet, són l'única forma de relleu positiva de les descrites a l'inventari de formes associades al microrelleu dels litorals calcaris.
- Tot i els controls relatius a la història geològica, al control estructural i a la forma del perfil, el *karren* litoral s'organitza d'acord amb la combinació d'un gradient biològic i un d'hidrodinàmic; per tant, en funció d'una zonació ecològica. L'ecosistema o els ecosistemes presents al llarg del perfil controlen, arran de les seves relacions ecològiques o funcionals, el desenvolupament de les formes d'alteració del rocam a diferents escales i ordres de magnitud, bé com a agents en el canvi del quimisme de l'aigua dels cocons, que en permet l'eixamplament per dissolució, bé per l'erosió dels grans i el ciment de la roca, o per la fatiga a què està sotmesa la roca arran de la perforació de cavitats i galeries que ofereixen una superfície major d'atac a altres processos, com l'acció mecànica de les onades, la dissolució o l'alteració per sals.
- El *karren litoral* és un exemple complex de biocarst perquè la dissolució, tot i ser el procés dominant sobre el rocam carbonatat, és principalment bioinduïda.

Conclusions generals

La memòria combina dues línies de treball. D'una banda, es vol aclarir quins agents i processos juguen un paper important en la dinàmica erosiva de les costes rocoses carbonatades, i com desenvolupen aquesta acció; i, d'altra banda, es persegueix comprendre de quina manera els elements identificats a l'apartat previ generen el micromodelat que hem vengut a designar com a *karren litoral*. Així doncs, des d'aquest punt de

vista es poden fer algunes consideracions de caràcter transversal a tota la memòria i marcar les línies cap a on haurien d'evolucionar futurs treballs:

- A una escala temporal curta, diària, i considerant aquells processos més continus en la dinàmica erosiva de les costes rocoses, la component biològica juga un paper capital en l'erosió, i també en la protecció del rocam carbonatat a les costes rocoses. Bé com a element que afavoreix el desmantellament de la roca amollant-ne els grans lentament (microbombament de la superfície rocosa), bé per l'atac químic i físic dels organismes sobre el ciment i els grans de la roca, o perquè poden canviar el quimisme de les aigües que, en un principi, no són agressives, la component biològica és important.
- L'estudi dels cianòfits, la seva sistemàtica i distribució, és essencial de cara a comprendre completament la dinàmica erosiva de la costa rocosa en el marc de les escales temporals i de recurrència que hem plantejat. Les anàlisis estadístiques indiquen que els cianòfits determinen la distribució dels organismes i l'estudi de les nanofomes com són d'importants els cianòfits en el desgast intern de la roca. Explicar les causes finals dels processos a les costes carbonatades passa per conèixer amb solidesa l'estructura dels biofilms de la roca.
- En aquest sentit, i incidint una vegada més en la importància de l'escala temporal i espacial, les experiències d'aquesta memòria conviden a no considerar el rocam de les costes rocoses com un element passiu sobre el qual actuen diferents processos i agents, sinó com a quelcom "viu" i dinàmic, en el sentit que la component biològica mediatitza el desmanegament de la roca afavorint l'erosió o reduint-la.
- Es fa necessari un mostratge espacial més dilatat en el temps, amb una major cobertura espacial, per tal d'aclarir el pes de cada un dels agents i processos identificats. Tot i que amb xifres grosseres es poden obtenir pesos relatius, la prudència aconsella, ara per ara, seguir considerant els processos aïlladament. El desenvolupament d'un escàner làser de dimensions més reduïdes que en faciliti el transport i l'estudi d'un nombre de superfícies majors per localitat, de més a més d'una major resolució vertical, seria un gran avenç. Si s'afegís un espectòmetre, llavors es podria lligar les taxes d'erosió a la densitat de cianòfits, o a la geometria del biofilm sobre la roca, a partir de la coloració de la roca que és un efecte ben clar de la presència i densitat dels cianòfits.
- El fenomen del microbombament de la superfície rocosa obre un ventall molt ample de possibilitats i línies de treball a seguir. Des de la seva simulació al laboratori, avaluant el paper de diferents espècies de fongs i líquens, o bé ampliant el marc temàtic i avaluant-ne l'acció a medis terrestres, l'alta muntanya o el patrimoni arquitectònic històric, per exemple.

Agraïments

En el vessant econòmic la realització d'aquesta tesi ha gaudit del finançament associat als projectes de recerca: **MAS3-CT98_0173**: ESPED finançat per la Unió Europea i **PB98-0132**, **BTE2002-04552-C03-02** i **CLG2006-11242-C03-01/BTE**, finançats pel Ministeri d'Educació i Ciència i FEDER. A l'autor li fou concedida una beca FPI de la Conselleria d'Economia, Innovació i Energia del Govern de les Illes Balears. Pel que tot allò que s'escapa al vessant econòmic, són tantes les persones que han contribuït en el desenvolupament de la tesi que resulta quasi bé impossible fer-ne esment en aquest resum. Tanmateix quedi palès el meu agraïment a totes elles.

Referència bibliogràfica de la tesi

GÓMEZ-PUJOL, L. (2006): *Patrons, taxes i formes d'erosió a les costes rocoses carbonatades de Mallorca*. Tesis Doctoral. Departament de Ciències de la Terra. Universitat de les Illes Balears. 243 pp. Ciutat de Mallorca.

Publicacions relacionades amb la tesi

A continuació es presenta un llistat dels treballs publicats que integren la tesi i que ofereixen amb major desenvolupament i detall les informacions aquí presentades:

FORNÓS, J.J. & GÓMEZ-PUJOL, L. (2002): Estudio integrado del lapiaz costero de Mallorca dentro del Proyecto ESPED: metodología y resultados preliminares. *Boletín de la SEDECK*, 3: 106-115.

FORNÓS, J.J., PONS, G.X., GÓMEZ-PUJOL, L. & BALAGUER, P. (2006): The role of biological processes and rates of downwearing due to grazing organisms on Mallorcan carbonate coasts (Western Mediterranean). *Zeitschrift für Geomorphologie, N.F. Suppl. Bd.*, 144: 117-135.

GÓMEZ-PUJOL, L. & FORNÓS, J.J. (2001): Les microformes de meteorització del litoral calcari de Mallorca: aproximació a la seva sistematització. *Endins*, 24: 169-185.

GÓMEZ-PUJOL, L. & FORNÓS, J.J. (2004): Forma, procesos y zonación en el lapiaz litoral del sur de Menorca, 1: aproximación morfológica. *In Benito, C. & Díez, A. (eds). Contribuciones recientes sobre Geomorfología*: 347-355. Madrid. CSIC.

GÓMEZ-PUJOL, L. & FORNÓS, J.J. (2004): Forma, procesos y zonación en el lapiaz litoral del sur de Menorca, 2: observaciones mediante microscopía electrónica de barrido. *In Benito, C. & Díez, A. (eds). Contribuciones recientes sobre Geomorfología*: 357-364. Madrid. CSIC.

GÓMEZ-PUJOL, L. & FORNÓS, J.J. (2004): Les microformes litorals del Migjorn de Menorca. *In Fornós, J.J. et al. (eds): Història Natural del Migjorn de Menorca: el medi físic i l'influx humà*: 245-258. Palma. Societat d'Història Natural de Balears.

GÓMEZ-PUJOL, L. & FORNÓS, J.J. (2004): Tasas de meteorización química en la costa carbonatada de Mallorca. Evaluación preliminar mediante tests de exposición (weight-loss rock tablets). *In Pérez-Alberti, A. et al. (eds). Procesos geomorfológicos y evolución costera*: 401-410. Santiago de Compostela. Universidade de Santiago de Compostela.

GÓMEZ-PUJOL, L., BALAGUER, P. & FORNÓS, J.J. (2002): Meteorización del patrimonio histórico en ambientes costeros marinos: el caso de la Torre d'en Beu (Santanyí, Mallorca). *In Serrano, E. et al. (eds). Estudios recientes en Geomorfología. Patrimonio, montaña y dinámica territorial*: 403-413. Valladolid. Universidad de Valladolid.

GÓMEZ-PUJOL, L., BALAGUER, P., BALDO, M., FORNÓS, J.J., PONS, G.X. & VILLANUEVA, G. (2002): Patronas y tasas de erosión de *Melaraphe neritoides* (Linneo, 1875) en el litoral rocoso de Mallorca: resultados preliminares. *In Pérez-González, A. et al. (eds). Aportaciones a la Geomorfología de España en el inicio del Tercer Milenio*: 351-354. Madrid. IGME.

GÓMEZ-PUJOL, L., BALAGUER, P., BALDO, M., FORNÓS, J.J., PONS, G.X. & VILLANUEVA, G. (2002): Técnicas instrumentales para el estudio de la meteorización y la erosión de las costas rocosas. *In Pérez-González, A. et al. (eds). Aportaciones a la Geomorfología de España en el inicio del Tercer Milenio*: 351-354. Madrid. IGME.

GÓMEZ-PUJOL, L., CRUSLOCK, E.M., FORNÓS, J.J. & SWANTESSON, J.O.H. (2006): Unravelling factors control on shore platforms and cliffs from microtidal coasts: the case on Mallorca, Catalonia and Sweden coasts. *Zeitschrift für Geomorphologie, N.F. Suppl. Bd.*, 144: 117-135.

PALMER, M., FORNÓS, J.J., BALAGUER, P., GÓMEZ-PUJOL, L., PONS, G.X., VILLANUEVA, G. (2003): Spatial and seasonal variability of the macro-invertebrate community of a rocky coast in Mallorca (Balearic Islands): implications for bioerosion. *Hydrobiologia*, 501: 13-21.

SWANTESSON, J.O.H., GÓMEZ-PUJOL, L., CRUSLOCK, E., FORNÓS, J.J. & BALAGUER, P. (2006): Processes and patterns of erosion and downwearing on microtidal rock coasts in Sweden and the Western Mediterranean. *Zeitschrift für Geomorphologie, N.F. Suppl. Bd.*, 144: 137-159.