

**MICROFORMES D'EROSIÓ PER CIANOBACTERIS A ROQUES
CARBONATADES LITORALS I LA SEVA DISTRIBUCIÓ EN RELACIÓ
A PARÀMETRES AMBIENTALS**

Autor: **Francesc Pomar Bauzà**

Data: gener 2011

Màster APGAL

(Màster d'Anàlisi, Planificació i Gestió d'Àrees Litorals)

Memòria projecte final de màster

Directors: Joan J. Fornós Astó i Lluís Gómez-Pujol

Continguts

1	Introducció	3
1.1	La costa rocosa: definició i problemàtica	3
1.2	Agents i processos en el modelat de les costes rocoses.....	4
1.3	Línies d'investigació actuals en la dinàmica erosiva de les costes rocoses	6
1.4	El paper de la bioerosió en el modelat del rocam litoral.....	8
1.5	Objectius.....	10
2	Zona d'estudi.....	11
2.1	Localització	11
2.1.1	Context geològic general.....	13
2.1.2	Clima.....	13
2.1.3	Onatge.....	15
2.2	Descripció geomòrfica de la Punta des Faralló	16
3	Materials i mètodes.....	18
3.1	Mostreig.....	19
3.2	Morfometria	20
3.3	Descripció de les formes	21
3.4	Variables d'estructura i ambientals	22
3.5	Anàlisi d'imatges	23
3.6	Microscopia electrònica d'escandallatge (SEM)	24
4	Resultats.....	24
4.1	Descripció de les formes	24
4.1.1	Diàmetre.....	25
4.1.2	Profunditat.....	26
4.1.3	Coalescència.....	27
4.1.4	Relació diàmetre/profunditat.....	28
4.2	Elements biològics associats	29
4.3	Distribució espacial del micromodelat	31
4.3.1	Absència-presència de formes.....	31
4.3.2	Densitat de depressions (pits).....	32
4.3.3	Variació en la dimensió de les formes	33
5	Discussió	35
6	Conclusions.....	39
	Bibliografia.....	40

1 Introducció

Els ambients litorals són uns dels espais de transició més complexos i de límits imprecisos ja que es presenten com un espai de contacte o de transició entre altres dos ambients totalment antagònics; el continental i el marí. Per tant, el fet de ser un zona de transició fa que sigui de per sí complex en interpretació, ja que tindrà una alt grau de dinamisme provocat per la diversitat de processos i agents que hi actuaran. Aquesta mateixa circumstància justifica que sigui una àrea en la qual hi hagi uns ritmes de canvi que raras vegades trobaren en altres àmbits del món, des de canvis sobtats produïts en hores o dies, fins processos més lents de centenars o milers d'anys (Pethick, 1984; Woodroffe, 2003; Servera, 2004). D'altra banda, les costes són una zona d'abundant concentració d'activitats humanes; gran part de la població mundial viu a prop de la costa, almenys el 50% de la població viu dins una franja que comprèn els primers 60 quilòmetres de la línia de costa (Woodroffe, 2003).

La geomorfologia litoral se centra en l'explicació del modelat costaner que apareix als ambients litorals, tot estudiant-ne la forma, els sediments i els ambients deposicionals històrics. Així mateix també es pot incloure l'estudi de la zona marina més pròxima a la costa, és a dir, la zona d'aigües més somes de la plataforma que rep influència d'alguns factors terrestres (Woodroffe, 2003). El principal enfocament que ha seguit la geomorfologia litoral ha estat el de classificar les formes de la costa. Aquesta classificació però, no se pot explicar sense la necessitat de conèixer quina relació existeix entre les formes i els processos i en quina escala espacial i temporal interactuen (Pethick, 1984; Finkl, 2004).

1.1 La costa rocosa: definició i problemàtica

La complexitat dels àmbits litorals es veu accentuada a les costes rocoses; Trenhaile (2002) fa referència a la complexitat i al dinamisme de la franja costanera i, especialment, emfatitza en les costes rocoses aquesta complexitat. Explica com les costes rocoses, a diferència dels altres tipus de costa, són un àmbit en el qual els processos evolutius són controlats per diversos factors naturals com les onades, les marees, l'alteració -física, química i biològica-, el vent, els moviments de vessant,

etc. Per altra banda, la definició o conceptualització de costa rocosa sempre ha estat en contraposició a les costes arenoses o de materials solts, en el sentit que les primeres han estat descrites com a erosives i les segones d'acumulació. En aquest sentit val la pena destacar el que plantegen Trenhaile (2002), Gómez-Pujol (2006) o Naylor et al. (2009), tot recomanant l'ús de termes com costes cohesives o consolidades i costes no consolidades; entenent les costes rocoses de materials durs i compactes com a cohesives i les costes arenoses com a no consolidades.

1.2 Agents i processos en el modelat de les costes rocoses

La diversitat de processos que actuen sobre les costes rocoses fa necessària la seva descripció i la identificació dels agents que participen en la seva evolució. La caracterització d'aquests processos posarà de manifest l'important dinamisme que suporta una costa rocosa en relació a l'alteració i erosió i la seva traducció en la formació del relleu costaner característic. Els processos que actuen sobre les costes rocoses normalment s'agrupen en cinc grans categories: processos hidràulics, processos mecànics, processos fisicoquímics, processos biològics i processos gravitatoris (Pethick, 1984; Woodroffe, 2003; Gómez-Pujol, 2006) que a continuació se descriuen.

Processos hidràulics: Els processos hidràulics inclouen totes les forces generades per l'onatge sobre la costa. La pressió hidrostàtica és la força que produeix la mateixa columna d'aigua i que augmenta amb la profunditat. La pressió dinàmica, relacionada amb el moviment de l'aigua, generada directament per l'onatge o els corrents, provoca forces de fricció, tensió i compressió que poden mobilitzar materials solts i augmentar l'efecte erosiu. L'impacte continuat de les onades provoca efectes de clapoteig, martelleig, abrasió i arrencament hidràulic sobre la roca. Cal afegir la pressió pneumàtica deguda a la interacció aire i aigua produït per l'onatge a esquerdes, cavitats i conductes. El tipus d'onada incident i la forma de la costa determinaran els diferents efectes i pressions esmentades, així com el seu abast espacial.

Processos mecànics: Aquests processos fan referència al desplaçament de materials solts per part de l'onatge. En resulten efectes d'abrasió (fricció i copeig de

fragments de roca transportats per les onades) i d'atrició marina (copeig de partícules que fragmenten la roca especialment sí aquest són de característiques i propietats mecàniques diferents).

Processos fisicoquímics: Els processos fisicoquímics estan relacionats estretament amb l'aigua marina. En realitat parlem de dues tipologies de processos diferents, els físics i els químics, però són processos d'alteració sovint tan interrelacionats que no se diferencien clarament.

Se poden destriar tres principals processos físics alteradors de la roca. L'alteració per l'acció de l'aigua sotmesa a baixes temperatures que provoca la congelació i augment del volum iniciant un efecte de falca dins les esquerdes i cavitats de la roca. L'alteració per sals, consisteix en el creixement de cristalls de sal dins els porus i esquerdes de la roca. En aquest cas són diversos els factors ambientals que poden condicionar el creixement dels cristalls com la humitat relativa, la temperatura o la contaminació de l'aire (Doehne, 2002; Smith et al., 2002). Finalment, la humectació i dessecació del substrat rocós de manera cíclica degut a temporals marins, pluges o marees, generarà un efecte d'expansió i contracció de la superfície de la roca que es saturi d'aigua, a més a més, aquest procés està estretament lligat a l'alteració per sals.

Els processos químics es resumeixen en la hidratació, la dissolució, la hidròlisi i l'oxidació, tots ells lligats a la presència d'aigua o a la combinació de l'aigua amb altres elements químics que alteren l'estructura molecular de la roca.

Processos biològics: Els processos biològics fan referència a l'alteració de la roca per part d'organisme viu. Aquests processos es poden classificar en tres grups: bioerosió, bioprotecció i bioconstrucció (Naylor i Viles, 2002). Fem referència a organismes que arran de la seva manera de viure per a alimentar-se graten la roca o l'ataquen amb àcids orgànics; d'altres per a protegir-se de les forces de l'onatge i aconseguir aliment que transporten les onades viuen enganxats a la roca, cobrint-la; finalment altres organismes tenen el seu hàbitat a dins la roca mateix (organismes epilítics, endolítics, chasmoendolítics i criptoendolítics) (Hoppert et al., 2004) com els cianòfits o algunes espècies de mol·lusc.

Processos gravitatoris: Fan referència a processos subaeris que es desenvolupen als penya-segats i a les plataformes litorals i estan directament relacionats amb la precipitació i l'escolament. Produeixen des de la caiguda de petits fragments de roca, moviments en massa, caiguda de grans blocs o reptació de vessants. D'altra banda, aquests processos es veuen contrarestats per la resistència mecànica de la roca, és a dir, les propietats físiques del rocam com la textura o les mecàniques com l'estratificació o la fracturació.

1.3 Línies d'investigació actuals en la dinàmica erosiva de les costes rocoses

Els darrers anys han aparegut diverses investigacions que posen de manifest un interès creixent pels processos d'alteració que actuen a les costes rocoses. Aquests han estat històricament un àmbit poc estudiat si ho comparem amb la quantitat d'estudis relatius a les costes d'acumulació (Naylor et al., 2009). Aquest fet bàsicament s'ha degut a l'interès evident d'aquest tipus de costa social i econòmicament (Trenhaile, 2002; Naylor et al., 2009). De fet les costes arenoses han centrat l'interès perquè els seus canvis físics han estat de fàcil identificació en una escala temporal humana, cosa totalment oposada al que correspon a una costa rocosa que sofreix un major nombre de processos i canvis la majoria d'ells a una escala espacial i temporal pràcticament imperceptibles (Trenhaile, 2002). Malgrat això, cal apuntar que les costes rocoses són el tipus de costa més abundant en el món (Naylor et al., 2009).

Estudis recents han començat a posar interès i les primeres bases per a arribar a aconseguir un estudi de les costes rocoses i les seves dinàmiques erosives. Aquesta major complexitat de la costa rocosa pel que fa a processos que l'afecten serà un fet que condicionarà que els enfocaments dels estudis hagin de ser per força de caire multidisciplinar (Naylor & Viles, 2002). D'altra banda, Naylor et al. (2009), Trenhaile (2002), Naylor & Viles (2002) i Spencer & Viles (2002), han contribuït a l'estudi de les costes rocoses, especialment les plataformes litorals. Els autors coincideixen en la necessitat d'arribar a conèixer l'escala temporal en la qual el rocam es veu alterat, entendre el funcionament dels processos que l'afecten, com se relacionen, què els controla i quins canvis es produeixen sota condicions ambientals diferents.

Bona part de les contribucions a l'entorn de la dinàmica erosiva de les costes rocoses donen a entendre que en l'alteració d'aquestes, un dels principals vectors és la presència de comunitats de microorganismes i macroorganismes, que amb la seva activitat biològica debiliten o desmaneguen el rocam (Naylor & Viles, 2002; Pohl & Schneider, 2002). Els organismes es veuen condicionats i s'han d'adaptar a les condicions ambientals del lloc on s'estableixen. Així com apunten els autors esmentats, la presència de comunitats biològiques és important per a entendre l'evolució dels processos evolutius de les costes rocoses, ja que qualsevol canvi en una determinada característica de l'ambient, pot ser determinant pels organismes i per tant, amb la seva interacció amb el rocam. Així ja ho apunta Trenhaile (2002), es pot conèixer l'evolució en els processos que afecten un ambient costaner a partir de les característiques de la colonització. En aquest sentit, Danin et al. (1982) ja descriu diferències en els organismes que colonitzen la roca segons el clima.

El desenvolupament del coneixement dels agents i processos bioerosius en ambients naturals, té la seva extensió i aplicació en el processos i les taxes d'erosió que afecten al rocam d'edificis i monuments històrics litorals (Doehne, 2002; Smith et al., 2002; Mottershead, 2003). D'una banda cal tenir en compte que els monuments es veuen afectats per la colonització d'organismes, però també poden ser alterats amb la precipitació de sals. Aquest darrer aspecte també és destacable en els processos de les costes rocoses. Segons els treballs realitzats, l'alteració del rocam per sals és un procés que també depèn en gran part de les condicions ambientals i climàtiques de la zona d'estudi. La temperatura, la humitat, el vent o la contaminació, així com també les característiques de la roca seran els factors més importants a l'hora d'entendre el procés d'alteració de la roca (Doehne, 2002; Smith et al., 2002; Viles, 2002).

A les Illes Balears, l'abundància de costa rocosa amb presència majoritària de litologies carbonatades han servit de base d'estudis descriptius, així com també per a diversos estudis de morfometria per a l'estudi dels diferents processos que hi actuen per tal d'entendre la seva gènesi i analitzar la seva evolució al llarg del temps. Especial èmfasi s'ha posat en l'estudi del retrocés de la costa, sobretot en penya-segats, però també s'ha estudiat l'erosió biològica produïda a les plataformes

litorals o la seva relació amb les formes resultants (Balaguer, 2005; Gómez-Pujol, 2006; Balaguer et al., 2007; Rosselló et al., 2007).

1.4 El paper de la bioerosió en el modelat del rocam litoral

Els estudis de geomorfologia de les costes rocoses recents, han demostrat com l'alteració i erosió de la roca, sobretot la roca calcària, es produeix de manera important degut a la presència de microorganismes que la colonitzen (Jones, 2000; Naylor i Viles, 2002). Aquests microorganismes utilitzen diferents estratègies vitals per colonitzar el rocam (Hoppert et al., 2004; Pohl & Schneider, 2002) tot resultant en una activitat de caràcter bioerosiu, encara que també es poden donar processos com la bioconstrucció o bioprotecció (Naylor & Viles, 2002). A més a més, aquests patrons de bioerosió, bioconstrucció o bioprotecció, estan determinats per les condicions ambientals que han de suportar les comunitats d'organismes que viuen a la costa (Spencer & Viles, 2002). Per exemple a la línia de costa s'hi poden trobar comunitats d'organismes disposats segons l'energia que suporten (Palmer et al., 2003). Els que es veuen sotmesos a majors energies i per tant, més exposats, tendeixen a ser bioconstructors, per contra, els organismes que se situen en zones més protegides o amb menys energia incident, tendeixen a ser bioerosius (Jones, 2000; Spencer & Viles, 2002).

Les comunitats típiques de microorganismes epilítics i endolítics que exerceixen una acció directa sobre el rocam carbonatat, estan integrades per cianobacteris, fongs i líquens (Gorbushina et al., 2000; Pohl & Schneider, 2002). Habitualment, aquests, presenten una estructura tan complexa, a vegades convivint en simbiosi (Pohl i Schneider, 2002), que és difícil separar i considerar de forma aïllada els seus mecanismes fisiològics i els resultats en l'alteració de la roca. D'acord amb la qual cosa diversos autors prefereixen anomenar-lo pàtina biològica o *biofilm* per referir-se a ells (Gorbushina et al., 2000; Pohl i Schneider, 2002; Hoppert et al., 2002).

La comunitat més característica d'aquests processos d'alteració del rocam, els cianòfits, perfora la roca produint una densa xarxa de galeries i microcavitats que evolucionen des de la superfície de la roca arriben a penetrar algun mil·límetre (900 µm) per sota d'aquesta. Aquest límit el defineix la profunditat de penetració de la llum

(Pohl & Schneider, 2002). El resultat és una densitat de perforacions que confereix a la superfície de la roca una textura esponjosa, incrementa la superfície i facilita l'acció erosiva d'altres processos associats com el impacte de l'onatge o de les gotes de pluja, l'alteració per sals, el vent o els diferents compostos associats amb la contaminació atmosfèrica (Naylor & Viles, 2002). Els cianòfits endolítics segreguen àcids o altres productes metabòlics que ataquen la roca. De fet, l'espai que queda entre la roca i la superfície del cianòfit està cobert per unes fibres que sobresurten de les parets del cos. Aquestes microfibrilles serien les responsables de la dissolució del substrat carbonatat, degut seu cycle fotosintètic i la captació-alliberació de CO_2 (Fig. 1.1.). Els efectes sobre el rocam són diversos. Els cianòfits ataquen la roca donant unes microformes característiques de dissolució. En els ambients costaners els cianòfits poden superar densitats de 800.000 individus per cm^2 i un sol tipus de cianòfit pot ocupar d'un 10% a un 30% de la superfície de la roca.

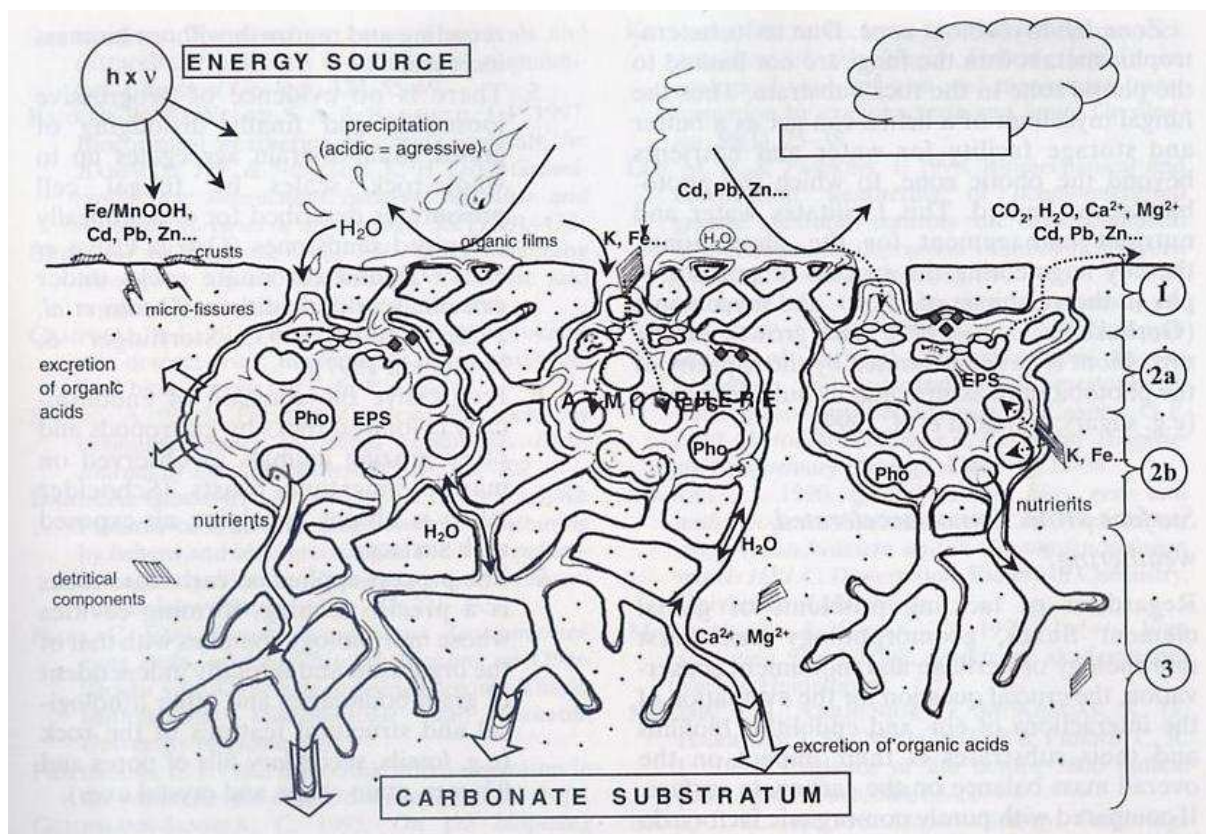


Fig. 1.1. Esquema de la colonització de la superfície de la roca per organismes endolítics. Les zones 1, 2 i 3 fan referència a les proposades per Pohl i Schneider (2002) en les quals s'hi produeixen diferents processos metabòlics. (Font: Pohl i Scheneider, 2002).

Dels mecanismes pels quals els cianòfits perforen la roca no es té una comprensió completa. Se suposa que els cianòfits endolítics segreguen àcids o altres productes

metabòlics que ataquen la roca. De fet, l'espai que queda entre la roca i la superfície del cianòfit està cobert per unes fibres i substàncies orgàniques que sobresurten de les parets del organisme (Gorbushina et al., 2000; Pohl & Schneider, 2002; Hoppert et al. 2002). Aquestes microfibrilles serien les responsables de la dissolució del substrat carbonatat, a través de les quals els cianòfits aconseguirien nutrients com el Ca o el CO₂ necessari per al seu cicle fotosintètic.

Els efectes sobre el rocam són diversos. D'una banda, els cianòfits ataquen els grans de la roca, així com també el ciment i la matriu (Pohl & Schneider, 2002) i generen un conjunt de microformes i cavitats. No es coneix però, quin és o quins són els vectors preferents que utilitzarien els cianòfits per a la destrucció del rocam. Així com en altres processos, com l'alteració per sals, es té constància com les variacions en la mida de gra de la roca o del porus o canvis en variables ambientals determinen com es produeix o desenvolupa aquesta alteració. Pel que fa al creixement de les colònies de cianòfits encara resta per demostrar quins són els factors que controlen el seu desenvolupament i patrons específics d'alteració del rocam.

Així com apunten diversos autors esmentats anteriorment, queden per determinar qüestions tan transcendents com el paper dels factors ambientals i propietats del rocam a la distribució de les formes que generen els cianòfits i l'evolució de les formes que habitualment van associades a aquests organismes.

1.5 Objectius

En l'estudi de l'alteració del rocam litoral per part de l'activitat biològica hi resten encara per aclarir certs aspectes per tal de gaudir d'una comprensió global del seu funcionament i evolució. En el marc dels processos de magnitud baixa en quant a l'erosió, però continus en el temps i per tant d'elevada freqüència, és necessari entendre el perquè i com es produeix la colonització de la roca per part dels organismes tant a escala temporal com espacial, així com identificar aquells controls ambientals que regeixen els processos biològics. Les costes rocoses centraran el present treball, intentant abordar l'alteració del rocam des d'un punt de vista més centrat en els processos que controlen les microformes i en la descripció de les

mateixes. L'atenció se centrarà en els factors que controlen la distribució de colònies de cianòfits i les seves formes associades.

El principal objectiu serà explorar els factors que controlen la distribució de les colònies de cianòfits i les microformes (\approx cm) que resulten de la seva activitat fisiològica i, per tant, quina és la seva implicació en termes d'erosió del rocam litoral i de les formes resultants.

Per tal d'assolir l'objectiu principal d'aquest treball s'ha caracteritzat els atributs i la distribució espacial del micromodelat de planta arrodonida (*micropits*) de l'àrea d'estudi. Finalment, ha estat necessari relacionar la informació obtinguda amb diversos factors ambientals com la insolació, el vent, la humitat o l'onatge.

2 Zona d'estudi

2.1 Localització

La zona d'estudi d'aquest treball se situa a la costa oriental de l'illa de Mallorca (Fig. 2.1.). Es tracta d'un petit sortint rocós anomenat Punta des Faralló a l'extrem est de la zona de Cala Ratjada dins el municipi de Capdepera. En aquest sortint rocós s'ha observat una abundant colonització per cianòfits amb la conseqüent generació de microformes exposades. La zona té una superfície aproximada de poc més d'una hectàrea; uns 150 m de longitud per uns 80 m a la seva zona més ampla. Per tant, per aquestes característiques mostra una forma allargada seguint la direcció NNE – SSW. El terreny presenta una topografia molt irregular, amb un pendent mitjà aproximat del 25% que comença a la seva part més baixa al costat oest de la península i se va alçant en direcció cap a l'est formant un penya-segat quasi vertical quan arriba a la costa d'uns 16 m d'altura màxima. Aquesta configuració de la península juntament amb la marcada inclinació que presenten els estrats de la roca plegats (90° de 110° i a 165° de 170°), conformen una àrea d'estudi plena de plans colonitzats en els quals s'hi poden fer observacions en diferents inclinacions i orientacions.

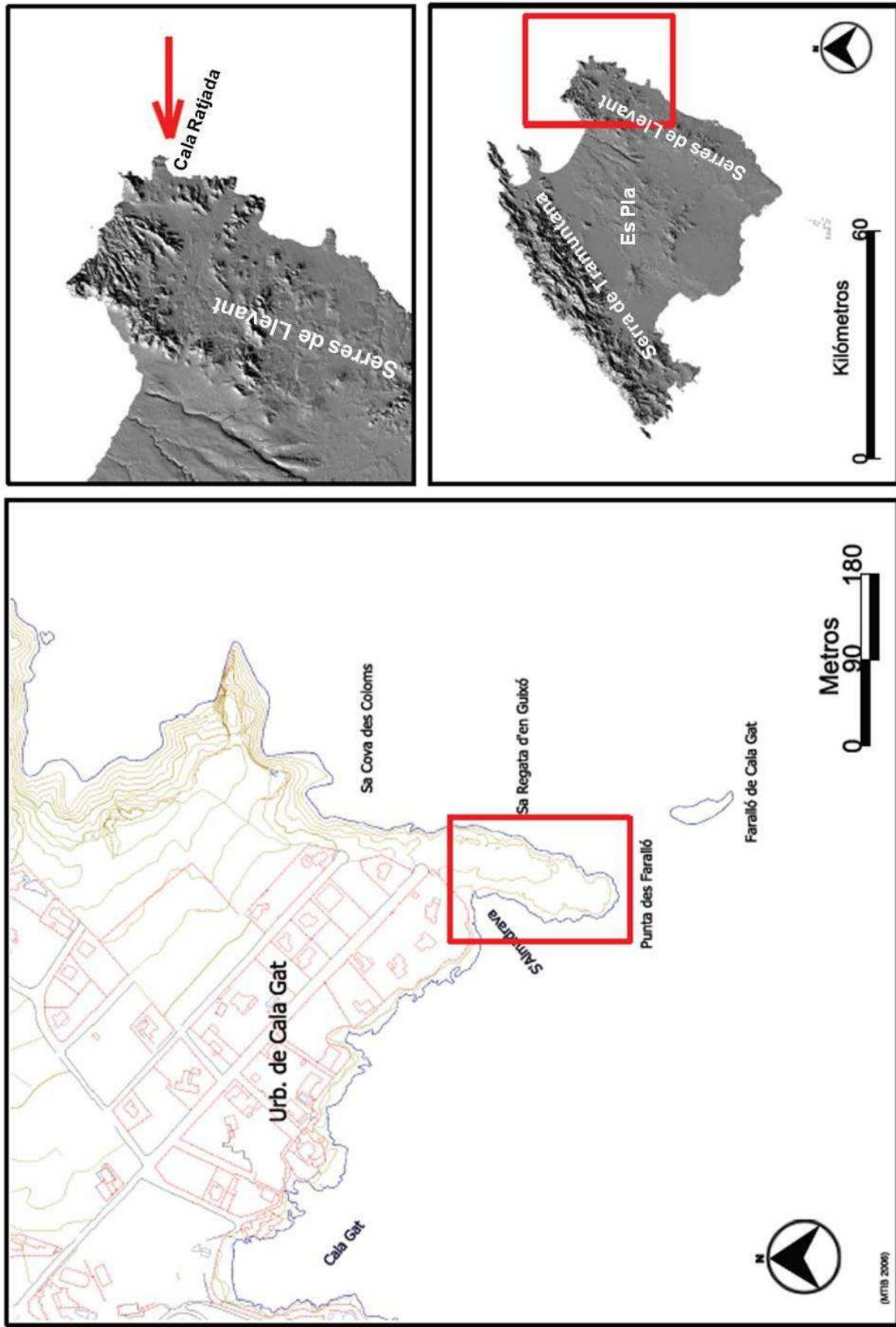


Fig. 2.1. Mapa de localització de l'àrea d'estudi.

2.1.1 Context geològic general

La Punta des Faralló constitueix part de les Serres de Llevant. La zona presenta relleus accidentats amb presència de turons i costes retallades que sovint mostren penya-segats. La meitat oriental del sector nord de les Serres de Llevant, que comprèn l'àrea d'estudi, presenta una geomorfologia de petites valls encaixades amb alguns penya-segats verticals controlats per una sèrie de falles produïdes pel Plegament Alpí que afecten a materials mesozoics principalment cretàtics (ITGE, 1991). En conjunt els materials predominants en aquesta zona són bàsicament calcàries i dolomies juràssiques, margocalcàries cretàtiques i calcarenites pliocenes.

L'àrea d'estudi se situa dins un aflorament de materials calcarenítics margosos del Cretaci inferior disposats, mitjançant contactes mecànics, entre dos blocs de materials dolomítics triàsics. En els materials triàsics poden aparèixer estrats molt brexificats amb un espessor d'ordre decimètric (ITGE, 1991). Per altra banda, els materials calcarenítics margosos del Cretaci inferior presenten un aspecte amb un alt grau de fracturació, amb una estratificació molt inclinada i amb una gruixa dels estrats que va d'uns decímetres fins a quasi un metre. La presència de quars dona una coloració blanquinosa i afegeix duresa a la roca. La textura de la roca predominant és la d'arenes fines a molt fines.

2.1.2 Clima

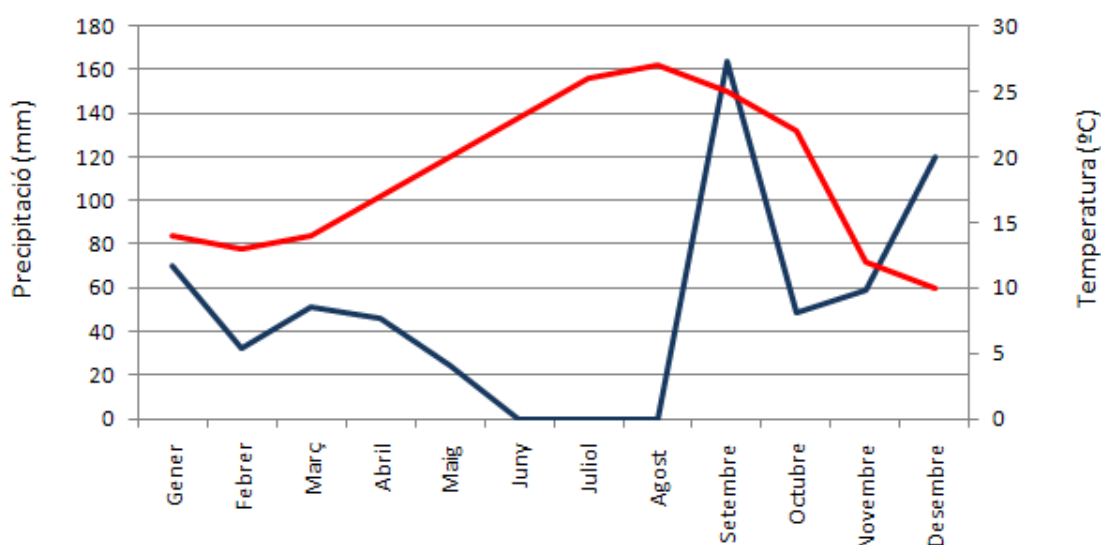


Fig. 2.2. Climograma que representa la distribució anual de les precipitacions i la temperatura de l'estació meteorològica de Cala Millor, zona pròxima a la Punta des Faralló. (Font: meteoclimatic.com i wunderground.com)

Les característiques ambientals de la zona d'estudi són típicament mediterrànies. Segons dades del període 2000-2009 (www.meteoclimatic.com; www.wunderground.com), la precipitació anual que es va registrar a la zona del llevant de Mallorca fou de 616 mm. La zona presenta un període sense precipitació que coincideix amb els mesos de juny, juliol i agost. El moment de major precipitació se produeix a partir del mes de setembre, registrant-se valors entre 60 i 160 mm (Fig. 2.2.). La humitat ambiental mitjana se situa en un 62,7%. La humitat al llarg de l'any és molt regular, presentant valors màxims entre els mesos de febrer i abril (valors superiors a 69%) però els valors més baixos que apareixen la resta de l'any no són inferiors a 56%. La temperatura mitjana anual és de 19,4 °C. Les diferències més destacables en entre les temperatures es produeixen entre els mesos d'estiu i la resta de l'any. A partir del mes de maig i fins el mes de setembre, les temperatures mitjanes no són inferiors als 20°C. El període de l'any més fred s'assoleix entre les mesos de novembre i febrer, els quals presenten temperatures al voltant dels 10°C (Fig. 2.2.).

Una altra variable a destacar pel interès de l'estudi es refereix a la direcció predominant dels vents. Segons les dades que proporciona l'estació meteorològica de Cala Millor (www.meteoclimatic.com; www.wunderground.com), al llarg de l'any les direccions predominants dels vents són clarament NNW i SE. Destaquen clarament els canvis estacionals (figura 2.3.) amb una marcada component S durant l'estiu i la primera part de la tardor i la component N durant el hivern, tot i que la variabilitat de direccions és major que a l'estiu. Comparant dades, el 24% dels cops de vent que es registren a l'àrea d'estudi procedeix de la direcció SE, seguit de la direcció N amb un 22%. Les direccions S i NW representen el 17 i el 13% respectivament (Fig. 2.4.).

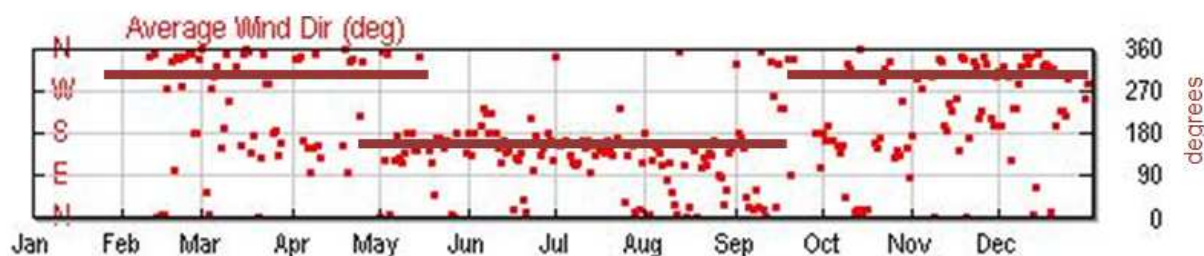


Fig. 2.3. Representació de la distribució anual de la direcció dels cops de vent. Es nota una tendència estacional dels vents molt marcada. (Font: wunderground.com)

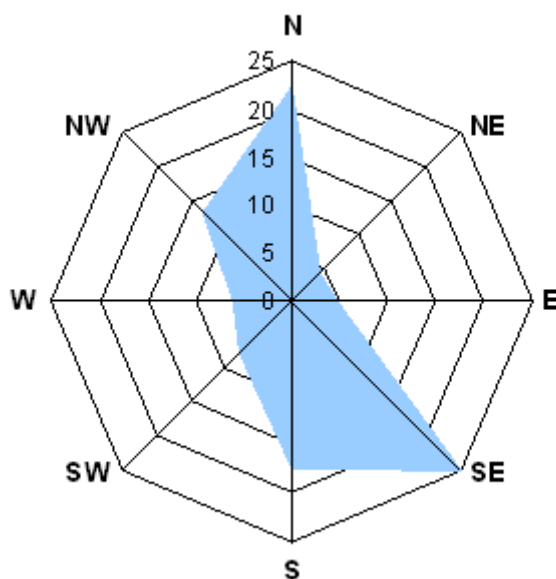


Fig. 2.4. Rosa de vents predominantis. Cops de vent expressats en percentatge.

Pel que fa la insolació, els mesos d'estiu es produeix el màxim, aconseguint també un angle amb més verticalitat d'incidència dels raigs solars sobre el terreny estudiat.

2.1.3 Onatge

L'onatge predominant a la zona procedeix bàsicament de la direcció N, en la qual també es registren les majors alçades d'onada. L'alçada d'onada predominant se situa entre els 0,2 -1 m i 1-2 m; representant quasi un 30% de l'onatge que procedeix d'aquesta mateixa direcció (www.puertos.es). Les alçades superiors a 2 m s'assoleixen majoritàriament des de la direcció N però les direccions NE i SW també representen un 3 i un 6% de les onades entre 1 i 2 m. (figura 2.5.). L'onatge procedent de la component E que agrupa l'onatge restant però amb unes alçades d'onada que majoritàriament no superen 1 m. Les direccions E i NE agrupen el 12% respectivament de l'onatge no superior a 1 m, així com també la direcció SE.

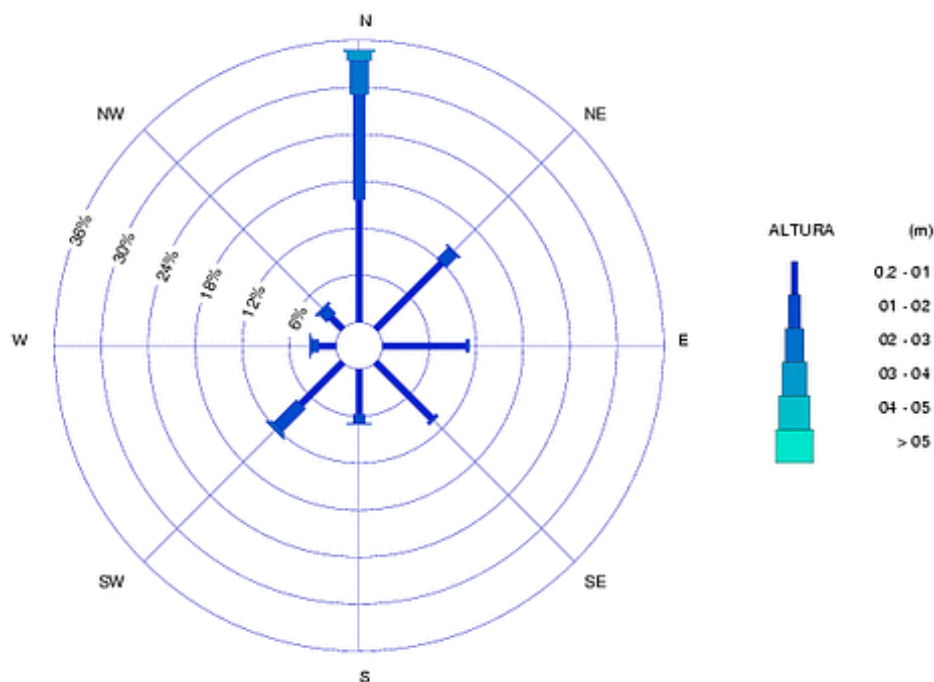


Fig. 2.5. Gràfic d'onades que mostra les alçades i les direccions predominants a la zona de Cala Ratjada. (Font: WANA2076037. www.puertos.es)

2.2 Descripció geomòrfica de la Punta des Faralló

El rocam de la Punta des Faralló presenta una aparença força reticulada, controlada per la presència d'esquerdes i fractures i per la pròpia inclinació dels plans d'estratificació degut al plegament de les capes cretàiques que posen de manifest un fort control estructural, depenent de dos sistemes de fractures principals a 90° de 110° i a 165° de 170° respectivament (Fornós et al., 2006). El resultat és un perfil irregular controlat per l'estructura geològica. La Punta des Faralló està formada per calcàries mesozoiques: biocalcarenites amb una dolomitització incipient. La porositat és d'1,29% i el valor de rebot del escleròmentre de 59,8 que, a l'escala de Selby, correspondria a una roca resistent (Gómez-Pujol, 2006).

Apareix una façana del penya-segat exposada a nord, a l'exterior de la badia amb una plataforma litoral de 1-6 m (Fornós et al., 2006) que, quan la fracturació ho permet, desenvolupa un relleu en forma de sapa (*notch*). En canvi, a recer de la badia, la façana dels penya-segats entra dins la mar i en destaquen *notchs* de dimensions modestes als quals s'adossen, per sota del nivell marí mitjà, *trottoirs* a mode d'andana.

El perfil transversal de la Punta des Faralló abasta un desnivell de 16 m. El perfil es pot dividir en cinc segments. Un primer segment correspon a una plataforma litoral, de 1 a 6 m d'amplària. Tot seguit d'un petit canvi de pendent, hi apareix una paret vertical de perfil còncau i un nou replà subhoritzontal que el corona d'aproximadament 10-20 m d'ample (Fig.2.6). A continuació es produeix progressivament un nou canvi de pendent que acaba al nivell de la mar amb un petit escaló inclinat de 5 m. A la base d'aquest escaló apareixen petits *notchs* amb *trottoirs* adossats a la base i alguna plataforma litoral d'amplària reduïda. D'altra banda, observant la Fig. 2.6. se nota una diferència entre el relleu de l'extrem S i l'extrem N de la zona d'estudi. L'extrem S mostra uns relleus més suavitzats; el penya-segat del costat E presenta un pendent baix i arriba a una alçada màxima d'uns 9 m. Cap a l'extrem N, el penya-segat va augmentant l'alçada fins a arribar a 16 m i es converteix en una paret pràcticament vertical.

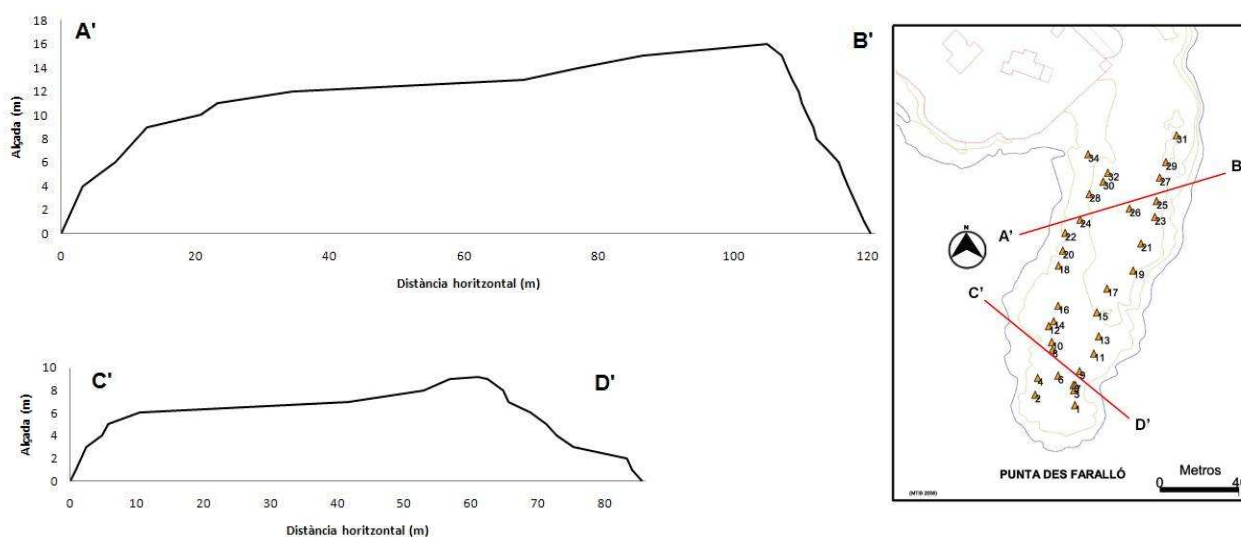


Fig. 2.6. Perfils topogràfics de la Punta des Faralló. L'extrem S mostra una zona amb pendents més suavitzats i relleus baixos, mentre que l'extrem N presenta relleus més abruptes i major alçada.

3 Materials i mètodes

A la figura 3.1. es presenta la síntesi del treball realitzat tot combinant la descripció de les formes i els controls que exerceixen les condicions ambientals. El treball ha estat dividit en dos grans blocs: una part descriptiva i una altra d'anàlisi. D'una banda la part descriptiva s'ha compost de treball de camp, treball de gabinet i anàlisi de cartografia geomorfològica de la zona. Del treball de camp s'ha obtingut informació descriptiva de les característiques físiques de les microformes –paràmetres morfomètrics, classificació de les formes- i s'han caracteritzat les variables ambientals i d'estructura de la zona d'estudi. El treball de gabinet ha ampliat les variables morfomètriques a través de l'anàlisi d'imatges. La cartografia geomorfològica de la zona contextualitza l'estructura i relleus a meso i macroescala del conjunt de l'àrea d'estudi.

El bloc d'anàlisi parteix de la informació obtinguda al bloc anterior relacionant les diferents variables descriptives en un anàlisi estadístic. El resultat d'aquest procediment ajuda a destriar quines relacions existeixen entre les característiques de les microformes i l'ambient on es desenvolupen.

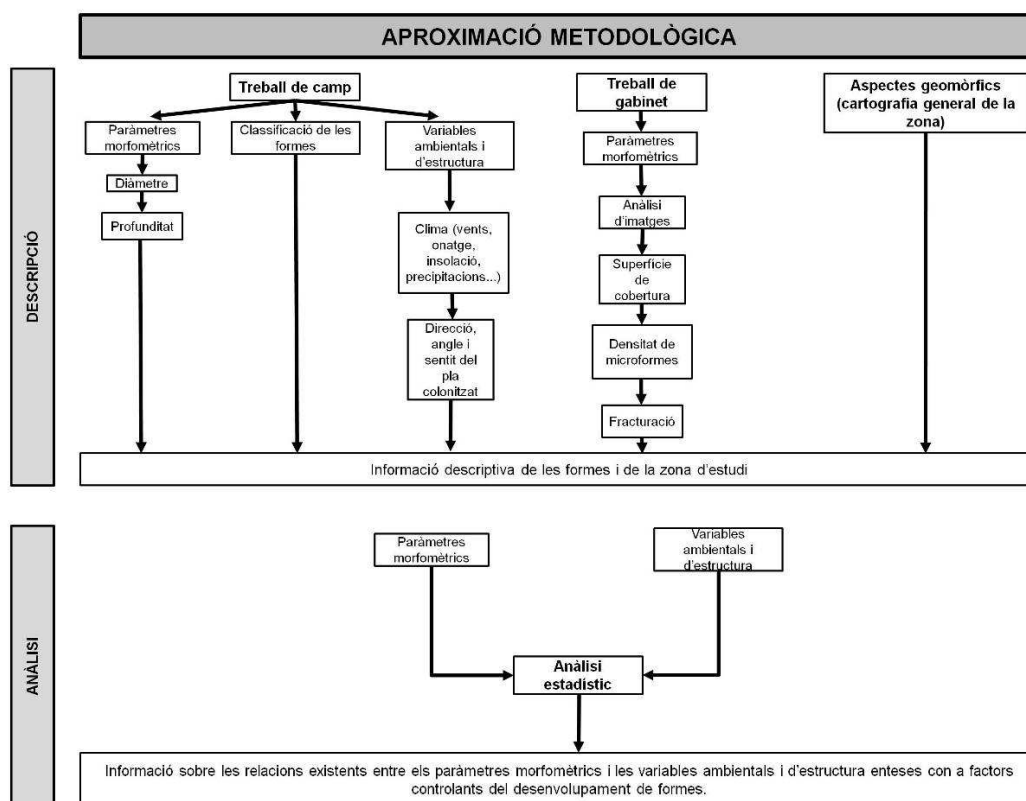


Fig. 3.1. Esquema sintètic de la aproximació metodològica realitzada en aquest treball. Els mètodes de treball s'agrupen en dos grans blocs, descripció i anàlisi.

3.1 Mostreig

Per estudiar el patrons espacials i el factors espacials que governen la presència de les colònies de cianòfits i el micromodelat associat, s'ha dut a terme un inventari de mostres seguint dos perfils longitudinals de direcció NNE - SSW a la Punta des Faralló.

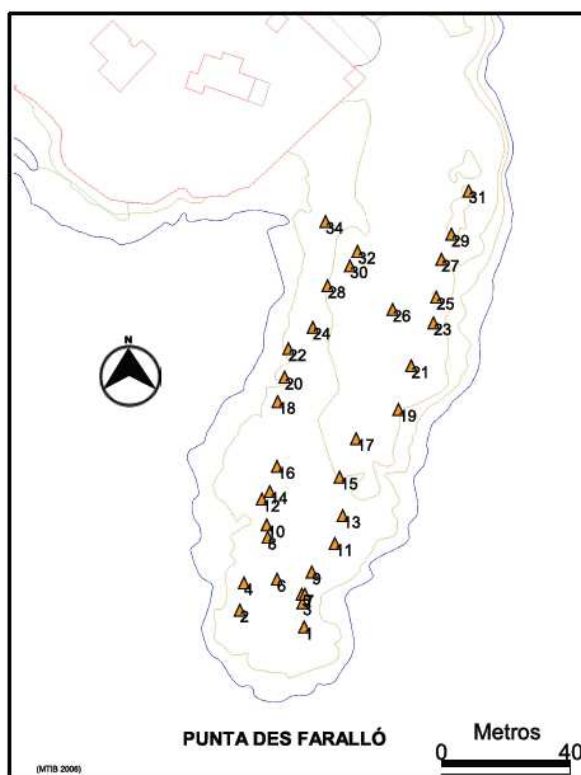


Fig. 3.2. Mapa de l'àrea d'estudi amb la localització de les mostres.

Cada mostra s'ha definit per una àrea de 20 x 20 cm, dins la qual s'ha dut a terme un comptatge de colònies de cianòfits i de cada mostra se n'ha pres una fotografia zenital per al seu posterior anàlisi pel tractament d'imatge, així com també les seves coordenades posicionals mitjançant GPS. S'han analitzat un total de 33 mostres en una àrea aproximada d'una hectàrea. El mostreig s'ha realitzat de manera aleatòria i estratificat.



Fig. 3.3. Imatge d'una mostra durant el mostreig al camp

3.2 Morfometria

Per a la caracterització de les microformes que generen les colònies de cianòfits s'ha mesurat l'amplada i la profunditat màxima d'entre 10-20 colònies per mostra. S'ha utilitzat un peu de rei per a realitzar les mesures.

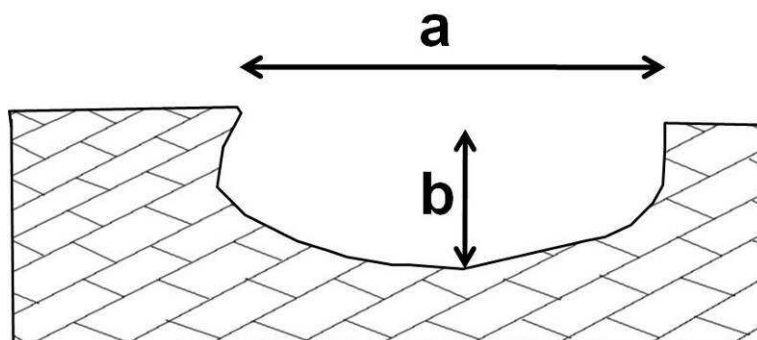


Fig. 3.4. Esquema de les dimensions mesurades sobre les microformes. Amplada màxima (a); profunditat màxima (b).

3.3 Descripció de les formes

Una descripció qualitativa de les microformes servirà per a identificar i classificar les característiques físiques de les mateixes que s'observen a l'àrea d'estudi. S'ha realitzat una classificació de les formes a partir de l'observació i posteriorment se'n dóna un indicador semi-quantitatiu de l'abundància de cada variable basat en l'escala SACFOR (Coombes et al., 2010). Les variables que s'han pres com a model (Taula 3.1.) per a la realització de la classificació han estat bàsicament una adaptació dels utilitzats per Johansson *et al.* (2001), que al seu treball realitza una descripció d'unes cubetes relacionades amb l'erosió glacial, que se situen sobre una litologia homogènia i un terreny molt fracturat. Malgrat la diferència d'escala (Johansson treballà amb magnituds quilomètriques; el present treball es refereix a escales centimètriques), els patrons de distribució i les formes s'assemblen, entenent que l'àrea d'estudi en la qual s'emmarca aquest treball presenta unes característiques litològiques homogènies i de marcada fracturació també. Per a realitzar l'indicador semi-quantitatiu de cada aspecte s'ha pres del model realitzat a Gómez-Pujol (2006) i Gómez-Pujol i Fornós (2009). Les variables utilitzades han estat: obertura, forma, límits, fons, posició en relació a la fracturació (esquerdes) i activitat biològica.

Variable	Definició	Classificació	Observacions
Obertura	Fa referència a la presència de límits oberts o tancats	Obert / Tancat	La interconnexió entre formes se considera obert
Forma	S'identifica a través de la forma dels perímetres de les microformes	Circular / Rectangular / Triangular / Allargat / Irregular	
Límits	Característiques dels límits	Recte / Sinuós / Dentat / Mescla	
Fons	Es refereix a les característiques observables del fons de la depressió	Pla / Rugós / Amb relleixos / Pàtina biològica	La majoria de microformes presenten abundant pàtina biològica, però aquest fet no exclou la presència dels altres tres aspectes que sovint vénen determinats pel desenvolupament dels organismes dins el fons
Posició en relació a la fracturació	Relació observada entre la presència de formes i la presència de petites fractures o esquerdes	Alineació amb una esquerda / Alineació amb dues esquerdes paral·leles / Intersecció de més de dues esquerdes / Intersecció d'esquerdes paral·leles	L'àrea d'estudi presenta una fracturació notable
Activitat biològica	Presència d'un cobriment per pàtina biològica de la microforma	Cianòfits / Líquens	Presència majoritària de colònies de cianòfits però també s'ha observat alguna colònia de líquens

Taula 3.1. Relació de variables utilitzades per a la classificació de les formes.

3.4 Variables d'estructura i ambientals

Per poder entendre els patrons i factors espacials que controlen la presència de cianòfits, és necessari identificar les variables que puguin condicionar el desenvolupament de colònies. D'una banda es tracta de variables referents a l'estructura de la pròpia àrea d'estudi que representen la posició del pla de cada mostra on existeix presència de cianòfits, i per l'altre, variables ambientals que veuran condicionada la seva incidència per les primeres.

Les variables que determinaran la posició del pla seran la direcció, el sentit i l'angle. La direcció es refereix a la que assenyala la intersecció d'un pla horitzontal amb el pla de cada mostra respecte el nord, expressat en graus. El sentit representa l'orientació del pla. L'angle s'obté amb la inclinació del pla respecte la horitzontal.

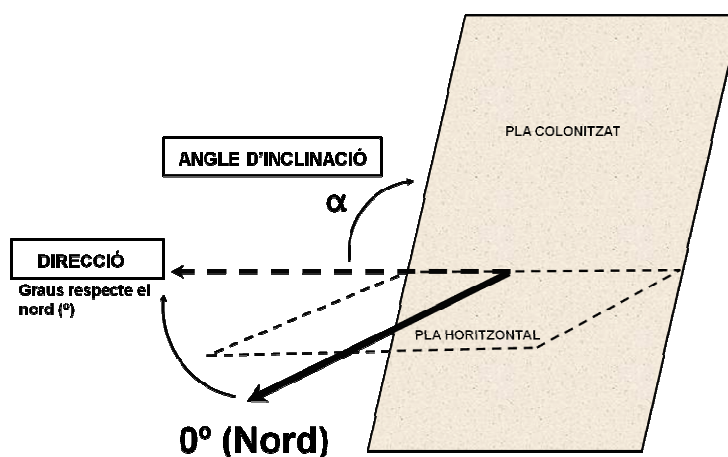


Fig. 3.5. Esquema representatiu de les variables d'estructura mesurades.

Les variables ambientals destacades que hem utilitzat per aquest treball són el vent, l'onatge i la insolació. Les dades de vent provenen de l'estació meteorològica de Cala Millor (www.wunderground.com i www.meteoclimatic.com) i es refereixen a la direcció predominant mitjana dels cops de vent que es produïren al llarg del període 2000-2009. En el mateix període, s'han extret les dades d'onatge predominant mitjà de la base de dades de "Puertos del Estado" (www.puertos.es). Es refereixen a les dades dels punts WANA2076037 i WANA2076038. L'exposició del camp d'estudi a la insolació es pot raonar a partir de les variables de la posició de cada mostra, entenent així que la direcció, el sentit i l'angle condicionaran la incidència de la llum solar sobre el pla, així com també l'alçada del Sol segons l'estació de l'any.

3.5 Anàlisi d'imatges

A partir de les imatges preses, s'ha dut a terme un comptatge de microformes i d'esquerdes a la roca. La superfície de cobertura de coalescència que presenta cada mostra s'ha calculat amb un programari lliure d'anàlisi d'imatges: "ImageJ" (Fig.3.6.). El comptatge de microformes i d'esquerdes servirà per a obtenir la densitat present a cada mostra dels dos aspectes. Per altra banda, el càlcul de la superfície de cobertura de la coalescència indicarà el grau de desenvolupament de les microformes. Ens referirem a coalescència com a aquell fenomen pel qual les microformes durant el seu desenvolupament i creixement tendeixen a unir-se donant formes de majors dimensions. S'ha calculat en cm^2 i expressat en percentatge de cobertura de la superfície respecte el total de cada mostra.

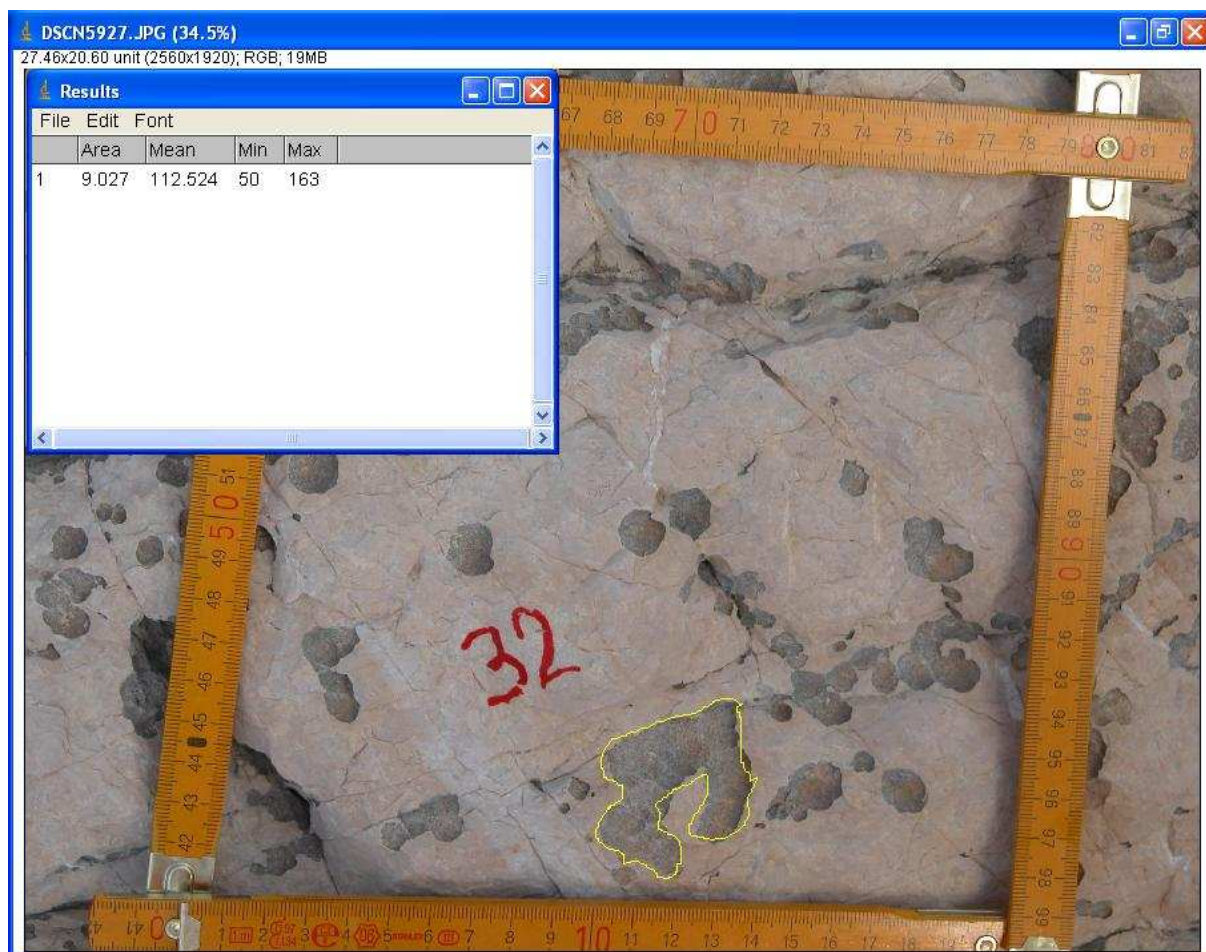


Fig. 3.6. Imatge del procés del càlcul de la superfície de cobertura a través d'una imatge zenital d'una mostra. La línia groga representa una part de la superfície de cobertura calculada.

3.6 Microscopia electrònica d'escandallatge (SEM)

Per a la identificació dels organismes biològics presents a la roca colonitzada, s'han obtingut mostres de roca mitjançant escarpra i martell. A través de les imatges preses amb el microscopi electrònic (SEM) se pot identificar el tipus d'organisme i el grau d'alteració de la superfície de la roca mitjançant la seva activitat biològica i les nanoformes associades (Viles, 1987; Viles i Moses, 1998). També és possible observar altres elements com la presència de cristalls de sal.

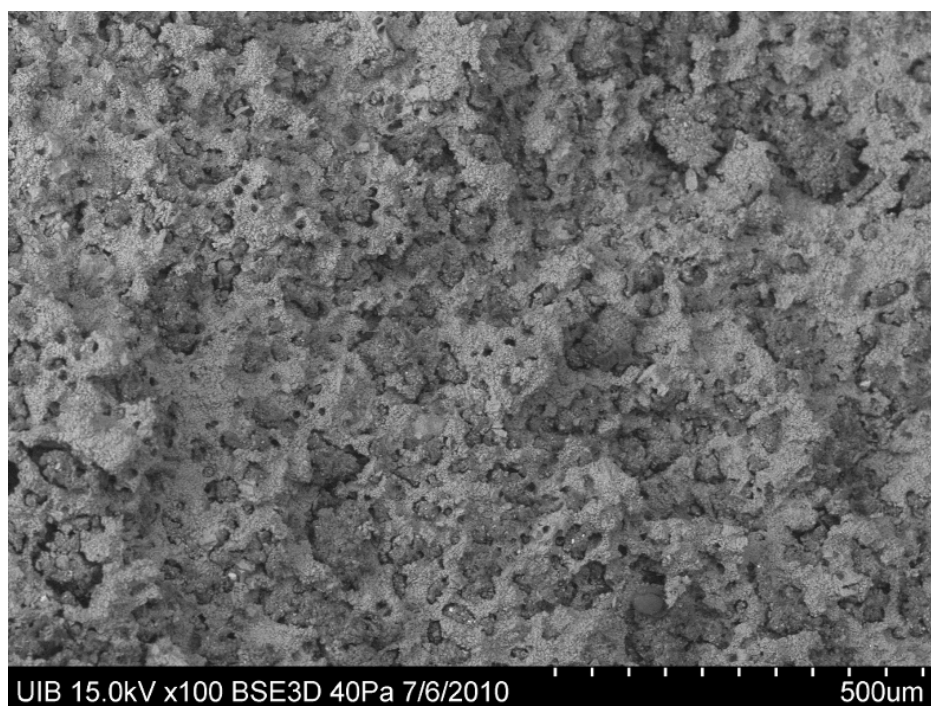


Fig. 3.7. Imatge de SEM d'una colònia de cianòfits en la qual s'hi poden identificar els individus i les formes que generen, així com també l'alteració de la roca produïda per estructures biològiques.

4 Resultats

4.1 Descripció de les formes

Les microformes associades a les colònies de cianòfits presenten un aspecte de petita cubeta ("pits, micropits o microalvèols") d'ordre mil·limètric. Aquestes petites depressions solen presentar una forma arrodonida, el·líptica o irregular en planta, i un fons arrodonit (Ford & Williams, 2007; Gómez-Pujol i Fornós, 2009). Poden aparèixer individualitzats o agrupats generant coalescència. La coalescència que és generada pel seu desenvolupament acaba conformant unes formes més àmplies i de

forma irregular. A la Fig. 4.1. s'observa la coloració obscura de l'interior dels pits produïda per la presència dels cianòfits.



Fig. 4.1. Imatge de detall de colònies de cianòfits. S'hi pot observar formes individualitzades i formes coalescents.

4.1.1 Diàmetre

El diàmetre de les microformes mesurades a l'àrea d'estudi presenta uns valors màxims entre 3,4 i 23,17 mm, el que suposa un valor mitjà de diàmetre màxim de 10,88 mm. Els diàmetres mínims oscil·len entre els 1,12 i 6,64 mm, amb un valor mitjà de 3,3 mm. El diàmetre mitjà total se situa als 6,49 mm (Taula 4.1.). El diàmetre més freqüent a les mostres és 4 mm. Valors de menys d'un mil·límetre no se n'han observat. A partir d'aquest valor, és destacable la variabilitat de diàmetres que mostren les mostres fins als 8,49 mm. Destaca el pic màxim de diàmetres entre els 4 i els 5,99 mm, amb una menor presència dels valors compresos entre 4,5 i 5,49 mm. Apareix també un altre grup de diàmetres entre 8,49 i 12,99 mm que ja corresponen a les formes coalescents de menor diàmetre. Les formes amb diàmetre superior a 10 mm se consideren coalescents (Fig. 4.2) ja que no s'han trobat micropits amb diàmetres superiors clarament individualitzats durant l'observació al camp.

	N	Mitjana	Desv Est	Valor mínim	Valor màxim
Diàmetre	382	6,49	9,95	1,12	23,17
Profunditat	381	2,46	20,58	0,05	13,25

Taula 4.1. Resum de les variables estadístiques de la distribució de les freqüències de diàmetre i profunditat.

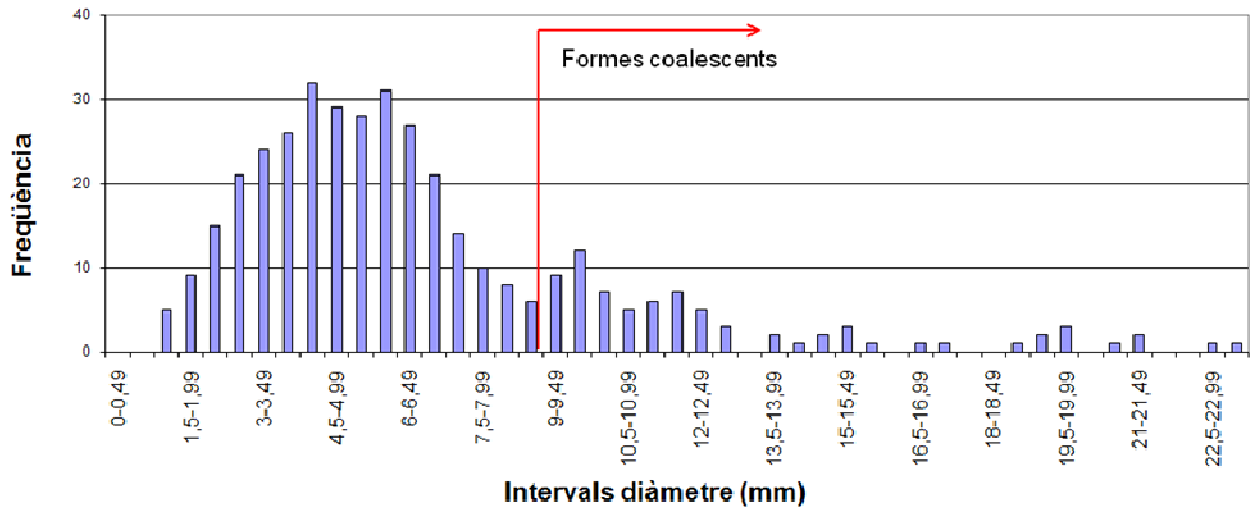


Fig. 4.2. Gràfic de la distribució dels diàmetres dels micropits mesurats a totes les mostres. A partir dels 10 mm algunes formes coalescents han estat mesurades.

4.1.2 Profunditat

La profunditat de les microformes observades presenta uns valors màxims entre 1,49 i 13,25 mm, cosa que suposa un valor mitjà de 4,55 mm. Les profunditats mínimes se situen entre els 0,05 i 2,65 mm, amb valor mitjà de 0,98 mm. La profunditat mitjana total és de 2,46 mm (Taula 4.1.). Les profunditats més freqüents

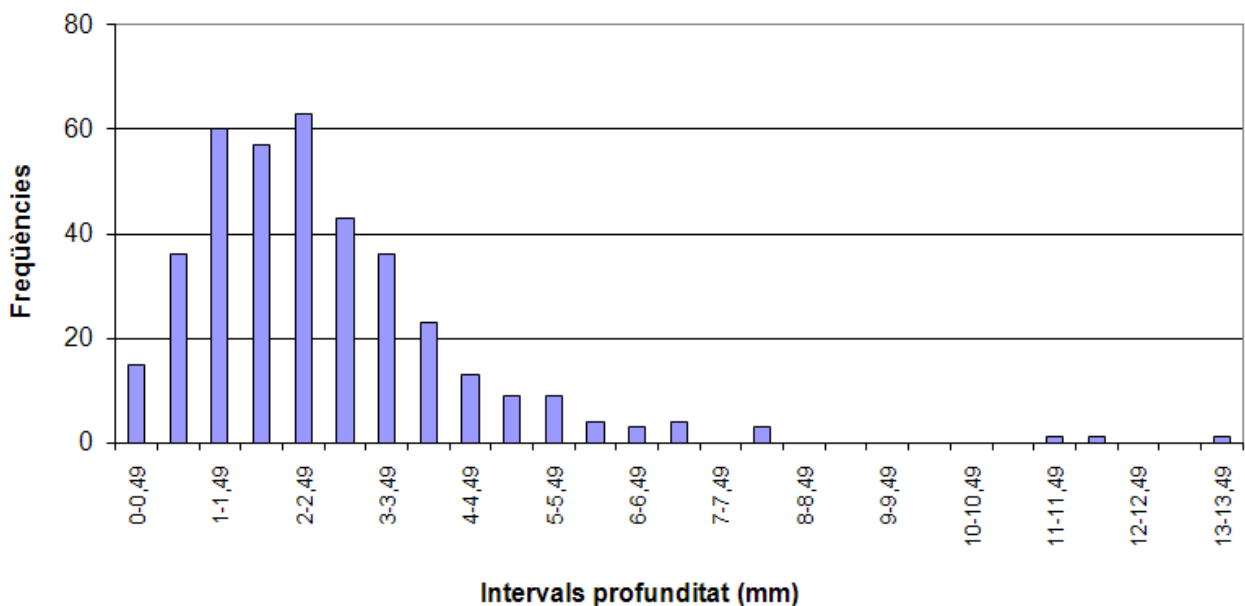


Fig. 4.3. Gràfic de la distribució de les profunditats dels micropits mesurades a totes les mostres.

oscil·len des d'unes escasses dècimes de mil·límetre fins a 5,49 mm. En aquest cas la moda és 1 mm. El pic més destacat el trobam als valors que se situen entre els 2 i 2,49 mm de profunditat. Els valors superiors als 5,49 mm pràcticament no n'han estat presents.

4.1.3 Coalescència

La cobertura de coalescència indica la superfície que cobreixen les microformes que se van unint degut al seu creixement respecte a la superfície total de cada mostra. Els percentatges de cobertura de coalescència que s'han pogut descriure van des de la nul·la cobertura d'una mostra per coalescència, fins a valors superiors al 30% de superfície coberta, arribant en algun cas a poc més del 41%. Els percentatges de cobertura més freqüents els trobam entre el 0 i 5%, 11 i 15%, el 21 i 25% i el 31 i 35%. La resta de percentatges de cobertura apareixen en alguna de les mostres descrites sense tenir una freqüència destacada.

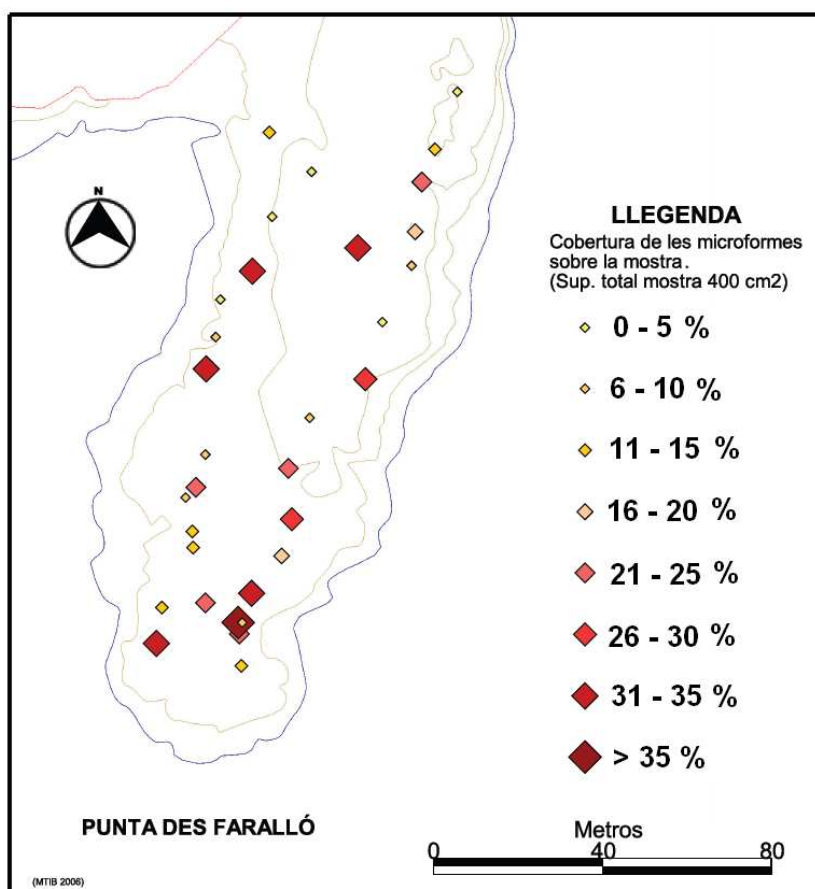


Fig. 4.4. Mapa de la distribució de la cobertura per coalescència dins l'àrea d'estudi.

4.1.4 Relació diàmetre/profunditat

La relació que podem establir entre el diàmetre i la profunditat (diàmetre/profunditat) pot indicar com varien les formes de mida. Valors de relació diàmetre/profunditat pròxims a 0 indiquen una magnitud major de profunditat respecte al diàmetre; valors superiors a 1 indiquen major magnitud de diàmetre respecte a la profunditat.

La relació diàmetre/profunditat més freqüent de les mostres estudiades és 2, no apareixen valors inferiors a 1 en cap mostra (Fig. 4.5.). Apareixen 6 mostres on s'observen valors compresos entre 3 i 4,49. Els valors que s'allunyen de 1 indiquen una predominança del desenvolupament en horitzontal de les microformes i per tant, una tendència major cap a la coalescència, generant formes de mides majors i que cobreixen més superfície de roca. En aquest estudi, de les 33 mostres estudiades, 28 presenten valors superiors a 2. Les formes estudiades en cap cas mostren un desenvolupament en vertical, és a dir, en profunditat ja que els valors inferiors a 1,5 són inexistents.

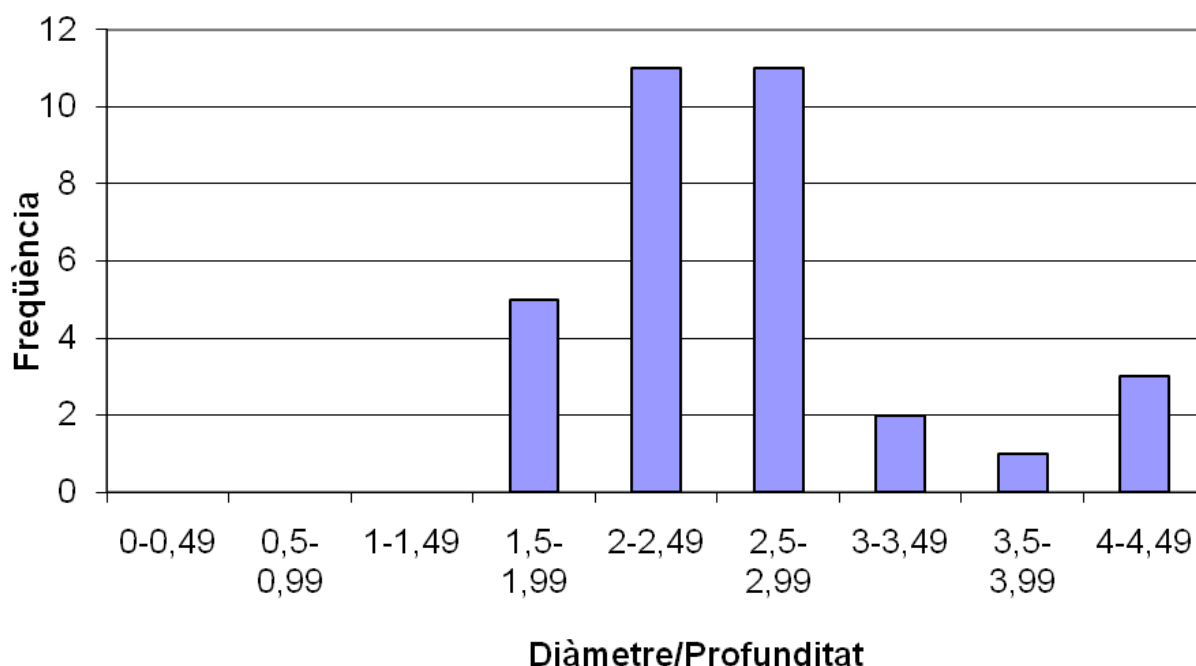


Fig. 4.5. Gràfic representatiu de la freqüència de la relació diàmetre/profunditat de totes les mostres de l'àrea d'estudi.

4.2 Elements biològics associats

El micromodelat que se superposa i matisa el perfil general de la Punta des Faralló, posa de manifest la importància dels processos de dissolució. L'eixamplament d'esquerdes, el desenvolupament de depressions de fons pla de distinta mida (des de cocons a microalvèols), així com la presència de microrills, són elements prou definitoris de l'efectivitat dels processos de dissolució característics dels rocams carbonatats (Gómez-Pujol i Fornós, 2001).

La presència de líquens en alguns inventaris, així com la intensa colonització i coloració dels fons de les microdepressions caracteritzades apunta cap a un control de la component biològica d'aquestes microformes. L'exploració mitjançant microscopi electrònic d'escandellatge, SEM, de les mostres de roca recollides permet explorar qualitativament els agents i els processos que operen en l'evolució del rocam a partir de la presència-absència de nanoformes tot seguint els protocols i les experiències de Viles (1987) i Viles i Moses (1998). Respecte del catàleg habitual de nanoformes presents als rocams carbonatats, l'element amb una abundància relativa més significativa són les depressions d'origen biològic (biopits) que afecten tant als grans com al ciment de la roca (Fig. 4.6. a i f) així com la presència d'una pàtina biològica que entapissa la superfície de la roca (Fig. 4.6.b). Juntament amb la presència de cristalls de sal, en alguns casos lleugerament dissolts (Fig., 4.6.b), és destacable l'elevat nombre de biopits, ca. 10 µm de diàmetre, que en el seu interior hostatgen cianòfits (Fig. 4.6.a, 4.6.b i 4.6.c). Els cianòfits, que colonitzen la roca tot cercant una profunditat d'equilibri que els permeti no ser depredats i reunir les condicions ambientals i fisiològiques necessàries per desenvolupar la seva activitat, poden arribar a desenvolupar depressions i galeries fins a varis mm part davall de la superfície de la roca. A les mostres explorades (Fig. 4.6.d) s'aprecia com les galeries dels cianòfits incrementen la porositat de la roca fins a profunditats properes al mil·límetre. Addicionalment, val la pena destacar com dites comunitats biològiques accentuen els processos de dissolució. Aquest procés és ben manifest al contacte dels organismes amb la roca (Fig. 4.6.e) on es pot percebre un arrodoniment general del límit de la depressió, això com altres nanoformes indicadores com són l'arrodoniment de grans, la dissolució preferencial del ciment o l'eixamplament de microfractures. Tot plegat resulta en un increment de

la porositat de la roca i en un increment de la rugositat de la seva superfície (Fig. 4.6.f).

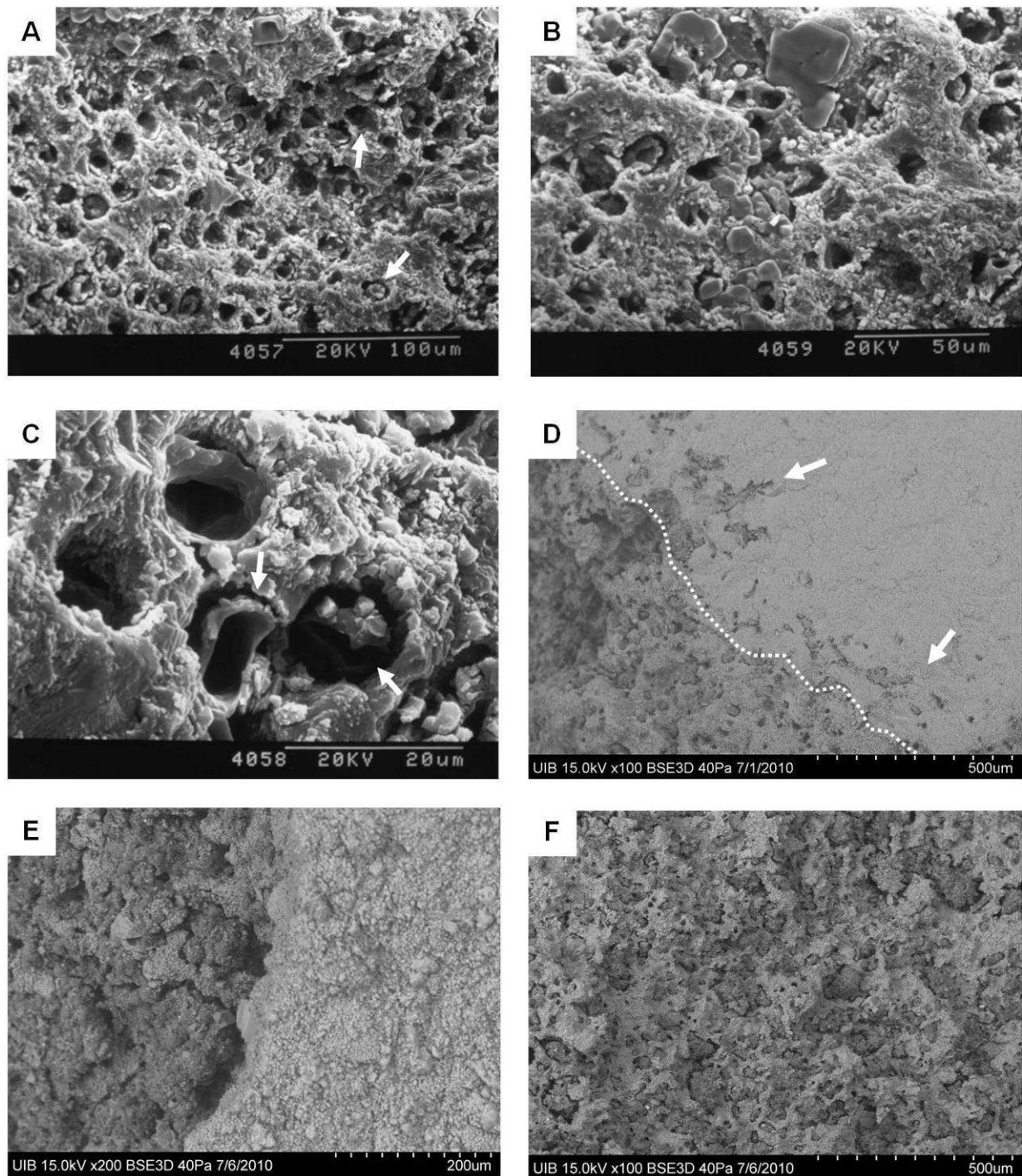


Fig. 4.6. Imatges preses mitjançant SEM que mostren com es produeix la colonització de la superfície de la roca. S'observa a les imatges A i B el conjunt de formes i petites cavitats que generen els cianòfits (assenyalat amb fletxes). La imatge C presenta un detall de les dues anteriors, en la qual s'hi pot observar assenyalat per les fletxes, cianòfits ocupant les petites depressions. La imatge D mostra un tall en secció de la roca (línia de punts) en el qual s'hi veu el desenvolupament en profunditat dels cianòfits (fletxes). La imatge E mostra el límit entre una colònia de cianòfits i la roca no colonitzada. La part esquerra de la imatge presenta una superfície de la roca totalment alterada per les estructures biològiques. La imatge F mostra la superfície d'una colònia de cianòfits.

4.3 Distribució espacial del micromodelat

4.3.1 Absència-presència de formes

La presència o l'absència de formes dins l'àrea d'estudi, s'ha pogut descriure en una sèrie de plans amb una orientació preferent. Les orientacions dels plans allà on trobam formes abracen des de SSW i cap a l'E. Destaca que als plans orientats cap al S i sobretot cap al SE no s'ha observat presència de formes (Fig. 4.7.). Les majors densitats de pits les trobam als plans orientats cap a l'W, NW i N, però també són destacables les orientacions NE i E i finalment en menor mesura al S i SW. El desenvolupament de la coalescència és major també en les orientacions esmentades però preferentment cap a l'W, NW i N.

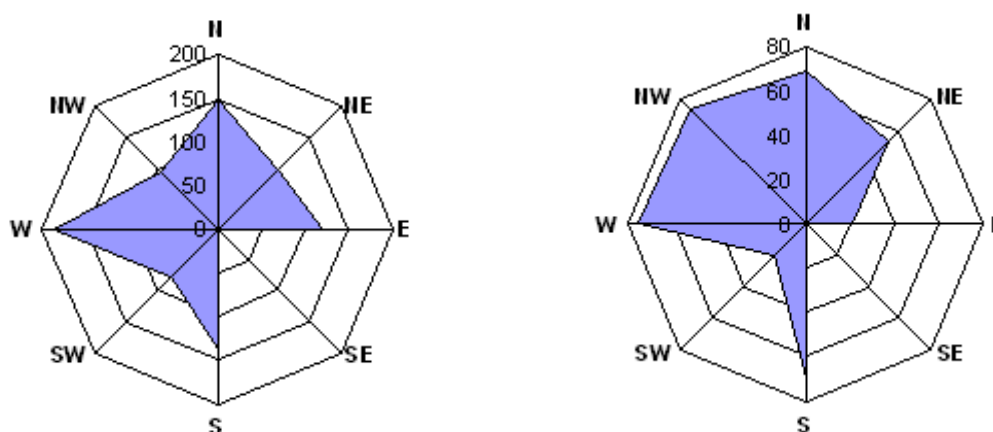


Fig.4.7. Roses de la densitat mitjana de micropits (esquerra) i superfície mitjana de cobertura de la coalescència en cm² (dreta) en relació a la orientació d'exposició del pla.

Una altra variable que també condiona la presència de microformes és la presència d'esquerdes. S'ha observat com mostres amb un major nombre d'esquerdes presenten una densitat major de pits (Fig. 5.6.) i també un desenvolupament de la coalescència major.

Pel que fa a la descripció de les microformes i de la seva presència, a la Punta des Faralló podem diferenciar els dos perfils. El desenvolupament de les formes defineix certes diferències entre els dos perfils. Per la qual cosa, de cada perfil (E i W) s'ha realitzat la classificació de les formes (Taula 4.2.) explicada anteriorment segons el

grau de presència observat per a obtenir un indicador semi-quantitatiu de les diferències que existeixen entre zones.

L'observació ha resultat que les formes més generalitzades als dos perfils són arrodonides i irregulars. Predominen les formes obertes però la seva presència és més abundant al perfil E. Als dos perfils apareixen formes amb límits sinuosos i dentats, però la combinació dels dos, és a dir formes irregulars, és el més freqüent sobretot al perfil E. Formes amb fons rugós és el més abundant al perfil E, amb un recobriment clar de microorganismes o pàtina biològica que al perfil W es menys present. Les esquerdes estan ben relacionades amb el desenvolupament de microformes. Apareixen moltes evidències de formes alineades amb esquerdes i sobretot, al perfil E que la presència d'esquerdes és major. Als dos perfils la colonització de la roca per cianòfits és clara, encara que alguna mostra presenta certa presència de líquens al perfil W.

PERFIL	OBERTURA		FORMA				LÍMITS				FONS				POSICIÓ EN RELACIÓ A LA FRACTURACIÓ					ACTIVITAT BIOLÒGICA		
	Obert	Tancat	Flodona	Rectangular	Triangular	Allargada	Irregular	Recte	Sinuós	Dentat	Mescla	Pila	Rugós	Amb relleixos	Pàtina biològica	Alineat amb una esquerda	Alineat amb dues esquerdes paral·leles	Intersecció de dues esquerdes	Intersecció de més de dues esquerdes	Intersecció d'esquerdes paral·leles	Cianòfits	Líquens
Est	+++	++	++	0	0	++	+++	0	++	+	+++	+	++	0	+++	++	0	+	+++	0	+++	0
Oest	++	++	+++	0	0	+	+++	0	+	++	++	0	+	+	++	+	0	++	++	0	+++	+

Taula. 4.2. Taula de la classificació de les formes per a cada perfil. +++ forma abundant, ++forma ben desenvolupada, + forma evident, 0 forma no evident.

4.3.2 Densitat de depressions (pits)

Ens referirem a la densitat de pits com al nombre de microformes que s'han pogut descriure a les fotografies de cada mostra. La densitat de pits de l'àrea d'estudi se situa entre la trentena de pits per mostra i més de tres-cents pits com a valor màxim. Les densitats de pits que apareixen a un major nombre de mostres estan situades entre els 50 i els 199 pits per mostra. A la Fig. 4.9. s'observa com la densitat de pits al llarg de la zona d'estudi mostra variacions espacials. L'extrem S de l'àrea d'estudi mostra algunes densitats superiors a 200 pits; la zona central i extrem N del perfil E

entre 100 i 200, sent aquestes dues zones les que presenten majors desenvolupaments.

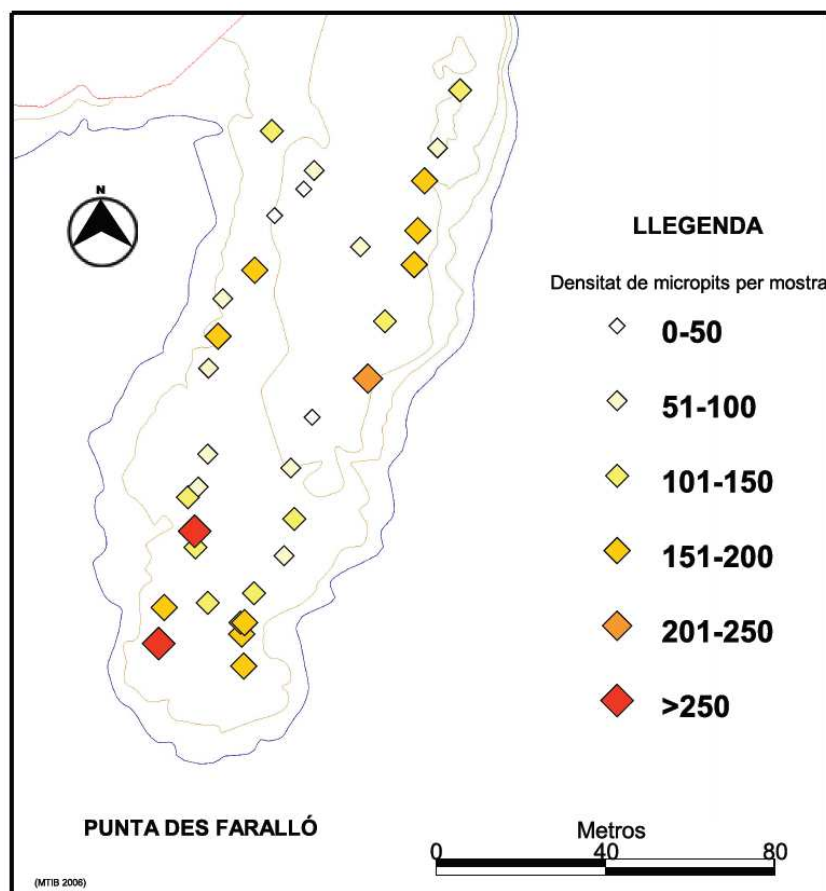


Fig. 4.9. Mapa de distribució dins l'àrea d'estudi de la densitat de microformes per mostra.

4.3.3 Variació en la dimensió de les formes

La variació en la dimensió de les formes indica com canvien les mides de les microformes dins l'àrea d'estudi. És a dir, l'existència de patrons espacials que s'observen pel que fa a canvis en les variables de diàmetre, profunditat i superfície coberta per coalescència.

Al llarg dels dos perfils longitudinals es manté la relació diàmetre/profunditat majoritàriament al voltant de 2. La zona situada a l'extrem S presenta valors pròxims a 3 cosa que demostra un desenvolupament del diàmetre important. A la zona central de l'àrea d'estudi apareixen valors pròxims a 2,5, és el tram amb valors més baixos. Al tram més septentrional del perfil E torna a predominar clarament el diàmetre sobre la profunditat amb valors pròxims o superiors a 3 (Fig. 4.10.). El perfil

W presenta alguns valors pròxims a 3 però amb tendència a disminuir cap a extrem N.

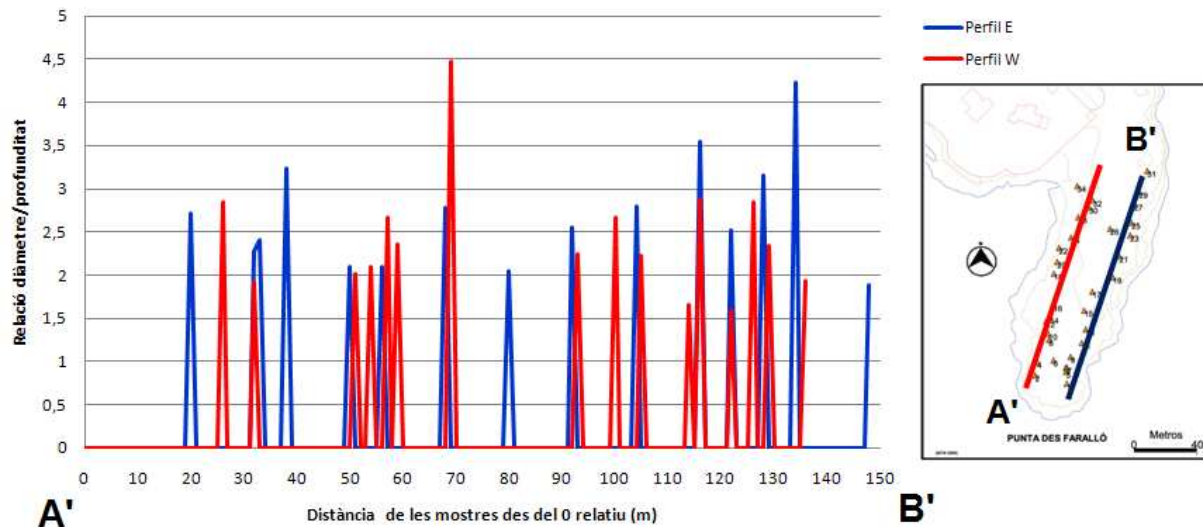


Fig. 4.10. Representació gràfica de la relació diàmetre/profunditat dels dos perfils longitudinals de mostres. La situació de les mostres està expressada en unitats de distància (m) des de l'extrem més meridional de l'àrea d'estudi que se considera 0 relatiu (A') i en sentit N (B').

La superfície coberta per coalescència de cada mostra, al llarg dels dos perfils longitudinals de l'àrea d'estudi es veu disminuïda des de l'extrem S i en sentit N (Fig. 4.11.). El perfil E com el perfil W presenten mostres amb major superfície coberta per coalescència a l'extrem S, disminuint cap al centre de la zona d'estudi. Per altra banda, des del centre cap a l'extrem N apareix un nou repunt de la superfície coberta però amb clara tendència a disminuir. En aquest tram el perfil W mostra major superfície coberta per coalescència que el perfil E. (Fig. 4.4. i 4.11.).

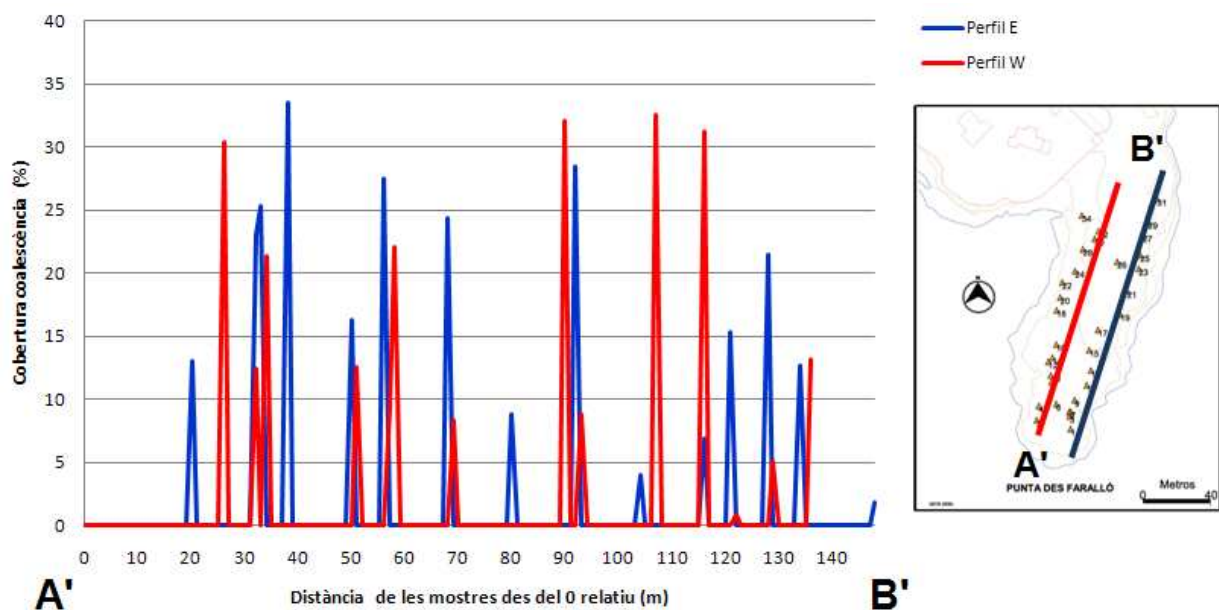


Fig. 4.11. Representació gràfica de la cobertura per coalescència dels dos perfils longitudinals de les mostres. La situació de les mostres està expressada en unitats de distància (m) des de l'extrem més meridional de l'àrea d'estudi que se considera 0 relatiu (A') i en sentit N (B').

5 Discussió

Els resultats obtinguts han mostrat certs patrons que les microformes associades a les colònies de cianòfits segueixen. D'una banda la seva morfometria mostra valors de diàmetre majoritàriament al voltant de 4 mm i de profunditat al voltant de 1 mm. D'altra banda, s'ha observat variacions de la presència de formes al llarg de l'àrea d'estudi. Les formes es desenvolupen a uns plans amb determinada orientació i a més a més, la localització de les colònies dins l'àrea d'estudi també es determinant degut a la seva configuració. A través de l'anàlisi estadístic de la informació que s'han obtingut als resultats, s'aconsegueix entendre quins són els aspectes que controlen el desenvolupament de les colònies de cianòfits i per tant, de les seves formes associades. Les correlacions realitzades entre les variables morfomètriques de les microformes (diàmetre, profunditat, densitat de microformes, cobertura de coalescència, etc) i les variables d'estructura (direcció del pla, angle, sentit) s'han realitzat tenint en compte totes les dades en conjunt i també separant-les per perfils: perfil E i perfil W. Han posat de manifest la relació directe entre el desenvolupament del diàmetre i la profunditat i el control pràcticament exclusiu de la direcció, que està directament relacionada amb el sentit de l'orientació del pla i la presència d'esquerdes. Això no implica que la resta de variables hagin de ser rebutjades sinó que poden ser necessàries per a contextualitzar algun aspecte.

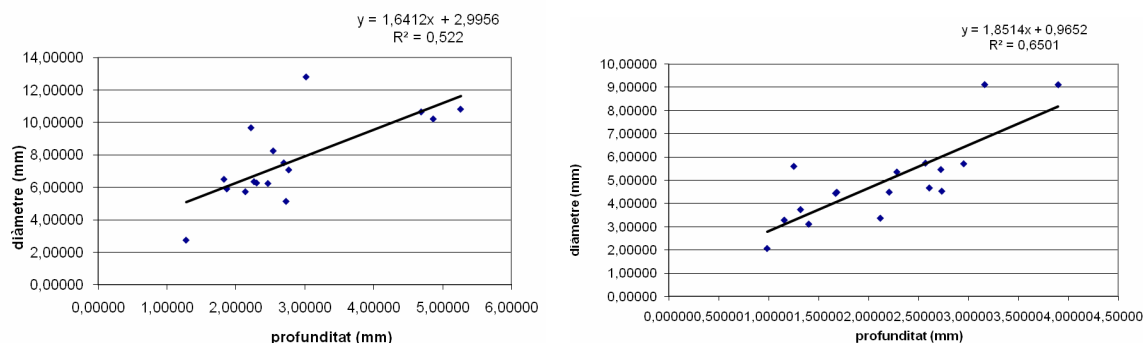


Fig. 5.1. Gràfics de correlacions entre diàmetre i profunditat de les microformes. Perfil E (esquerra), perfil W (dreta).

La relació directe entre el diàmetre i la profunditat de les microformes és clara ja que un augment del diàmetre permet un augment de la profunditat (Fig. 5.1.). Aquest augment sembla que es produeix de manera proporcional majoritàriament en les microformes ja que els valors de diàmetre són el doble que la profunditat. Queda reflectit en l'abundància de valors de relació diàmetre/profunditat pròxims a 2. Pel que fa a la direcció i al sentit del pla colonitzat, s'ha observat una important correlació entre aquestes variables i la densitat de formes per mostra, així com també de les característiques morfomètriques. D'aquesta manera apareixen plans amb una direcció preferent per al desenvolupament de les microformes; a la Fig. 5.2. i 5.3. s'observen aquestes direccions preferents que pràcticament als dos perfils coincideixen. La Fig. 4.7. mostra els sentits d'aquestes orientacions i presenta les orientacions NE, N, NW, W, SW i S com les orientacions on el desenvolupament de les formes és major. Destaca la orientació SE que no presenta desenvolupament de formes. En aquest sentit, s'entén que el desenvolupament de les colònies de cianòfits està condicionat pel grau d'exposició de la roca als agents externs com el vent, l'onatge o la insolació. Les orientacions descrites en aquest treball mostren com els plans amb major colonització són els que estan protegits dels vents (component N, S i SE) i onatge predominats directes (component N, E i S), així com també de la insolació directe. En general les orientacions dels plans són les oposades a les direccions dels agents però els plans amb orientació de component N i E estan protegits del vent i onatge predominats del N i E degut a que la topografia de l'àrea d'estudi ho permet. Respecte a la insolació, s'ha pogut observar certes diferències entre el hivern i l'estiu; al hivern les colònies de cianòfits mostraven evidències d'activitat biològica, mentre que a l'estiu les observacions al camp i amb microscòpia electrònica mostraven les colònies amb nul·la o molt baixa activitat biològica. Cal destacar que l'angle d'incidència directe de la insolació a l'àrea d'estudi durant el hivern és més oblic, motiu pel qual la inclinació dels plans colonitzats afavoreix la presència de plans més ombrívols.

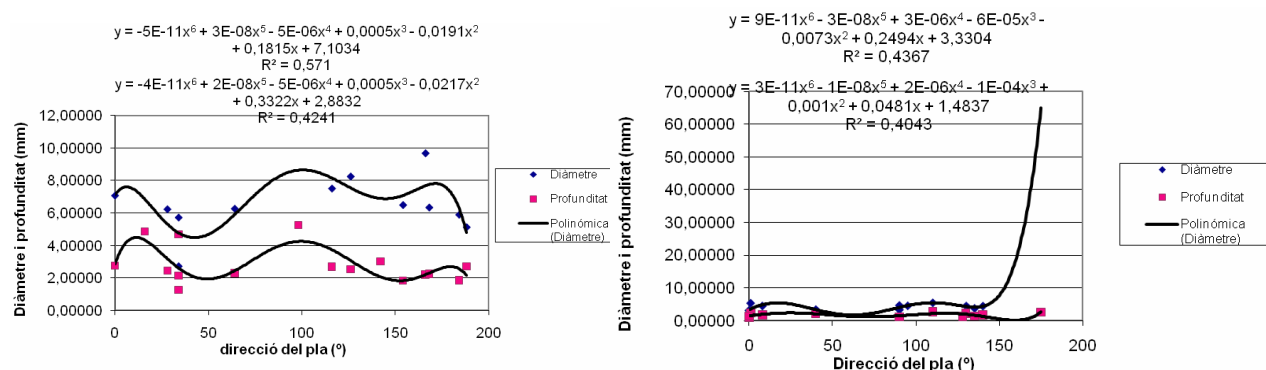


Fig. 5.2. Gràfics de correlacions entre variables diàmetre i profunditat i direcció del pla colonitzat. Perfil E (esquerra), perfil W (dreta).

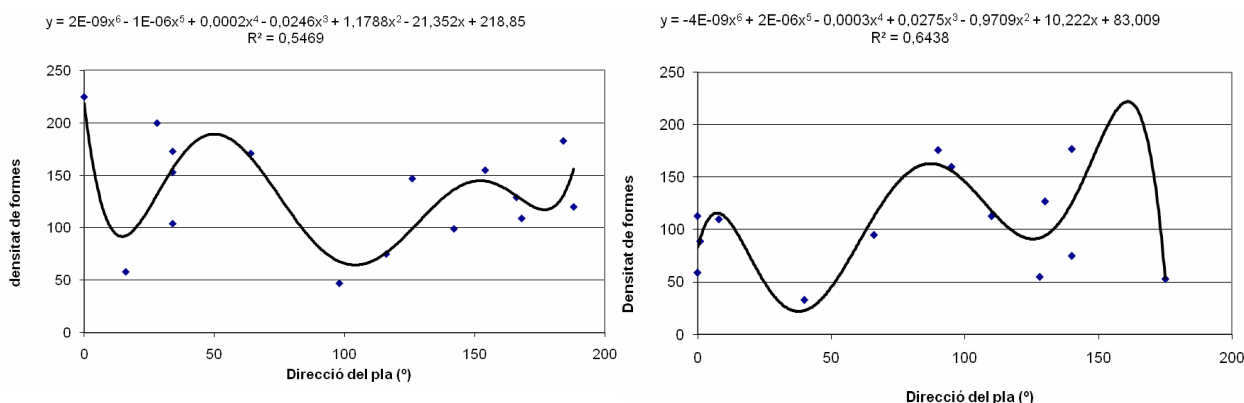


Fig. 5.3. Gràfics de correlacions entre densitat de formes per mostra i direcció del pla colonitzat. Perfil E (esquerra), perfil W (dreta).

D'altra banda, les característiques morfomètriques de les formes també es veuen influïdes per la direcció i l'orientació del pla. La relació diàmetre/profunditat mostra relacions importants amb la direcció sobretot als dos perfils. A la Fig. 5.4. s'observa com les direccions preferents de desenvolupament de les formes coincideixen amb les direccions on la relació diàmetre/profunditat augmenta i que per tant indicaria unes formes de major mida i un grau de coalescència major. L'anàlisi estadístic ha posat de manifest també la relació existent entre el grau cobertura de la coalescència i la direcció (Fig. 5.5.). Les característiques morfomètriques (densitat de microformes, cobertura de la coalescència, relació diàmetre/profunditat) presenten també gradients espacials en sentit S-N. La topografia és clau en aquesta qüestió ja que les zones amb major exposició als factors ambientals (esp. l'onatge) són les de l'extrem S de l'àrea d'estudi que coincideixen amb topografies més baixes. Aquest fet indica que uns relleus més suavitzats ajuden a l'aport d'humitat per part de l'onatge i la colonització pot ser major (Palmer et al., 2003). Aquestes zones presenten densitats de microformes i graus de coalescència majors, així com també relació diàmetre/profunditat al voltant de 2 o superior (Fig. 4.10.). Entre els

dos perfils s'han observat diferències en el desenvolupament de les formes. El perfil E presenta valors de relació diàmetre/profunditat majors que el perfil W com s'observa a la Fig. 4.10., cosa que demostra un desenvolupament major de les formes. En aquest cas, malgrat que cap a l'extrem N el perfil E se situa sobre el penya-segat més elevat, podem entendre que pot rebre més humitat procedent de l'onatge en forma d'esquitxos que no el perfil W situat a menor alçada i al costat interior de la badia.

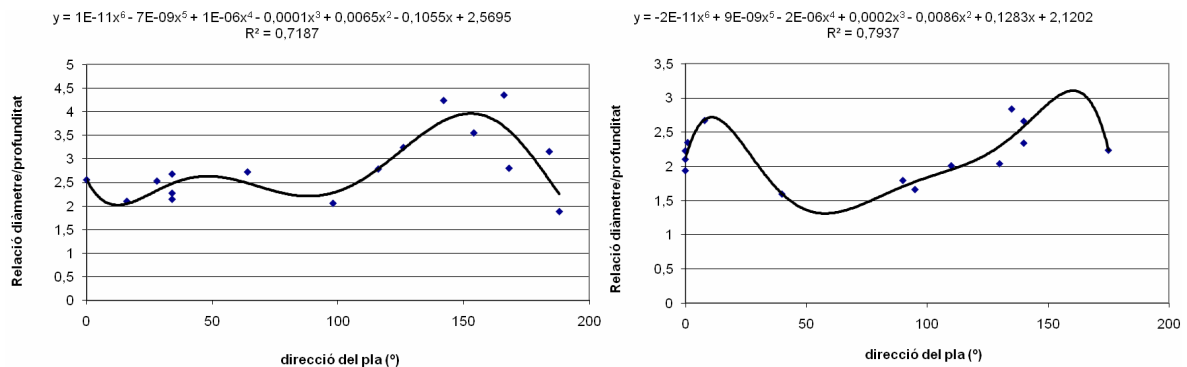


Fig. 5.4. Gràfics de correlacions entre la relació diàmetre/profunditat i direcció del pla colonitzat. Perfil E (esquerra), perfil W (dreta).

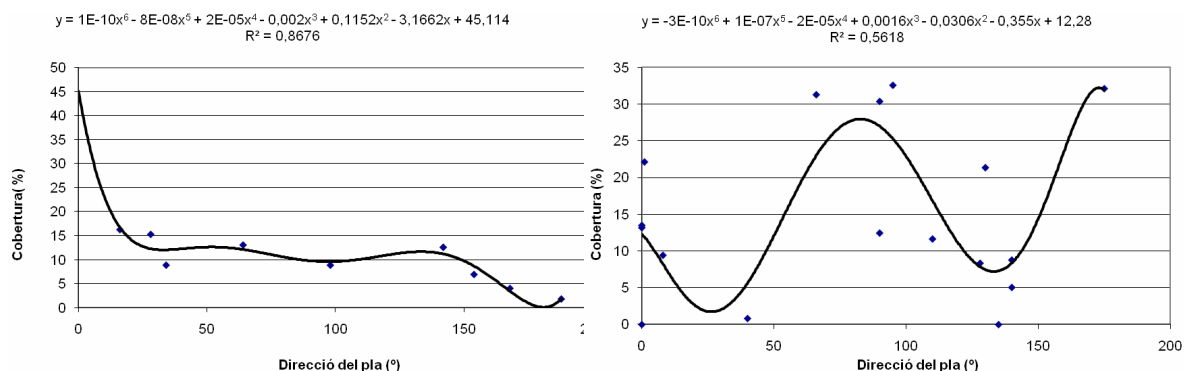


Fig. 5.5. Gràfics de correlacions entre la superfície de cobertura de coalescència i direcció del pla colonitzat. Perfil E (esquerra), perfil W (dreta).

Un altre control de caire més estructural que s'ha descrit durant l'estudi ha estat la presència de fractures o esquerdes. Als dos perfils, la presència de fractures ha condicionat el desenvolupament de les microformes. Un major grau de fracturació de la mostra presenta una major densitat de formes (Fig. 5.6.). Les esquerdes tenen un fort control sobre el desenvolupament de les formes, com s'observa a la Fig. 5.7. les colònies de cianòfits s'estenen seguint les fractures que són la zona on la humitat es conserva més.

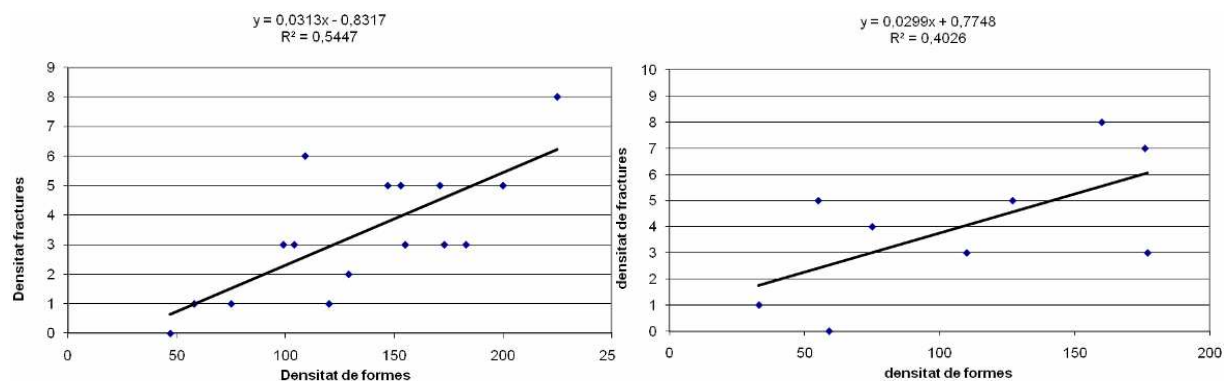


Fig. 5.6. Gràfics de correlacions entre densitat de fractures i la densitat de formes per mostra. Perfil E (esquerra), perfil W (dreta).



Fig. 5.7. Imatge d'un pla de la roca colonitzat per cianòfits en el qual s'observa un desenvolupament de les colònies seguint la fracturació preferentment.

6 Conclusions

La Punta des Faralló és una zona amb una litologia, orientació i topografia favorables com a camp d'estudi de la colonització de la roca. Les característiques de les formes i la seva localització dins l'àrea d'estudi han mostrat uns patrons clarament controlats pels agents ambientals externs i la pròpia configuració estructural de l'àrea d'estudi. Pel que fa a morfometria de les microformes, s'ha comprovat com majoritàriament se compleix el que apunta la bibliografia existent; les formes presenten un diàmetre el doble que la profunditat (Ford i Williams, 2007). S'han observat unes orientacions preferents dels plans colonitzats als quals el

desenvolupament de les formes és important. Aquestes orientacions han mostrat com a zones òptimes per al desenvolupament de colònies de cianòfits les zones més a recer dels vents i de la insolació. Cal destacar que la topografia irregular de l'àrea d'estudi juga un paper important en la protecció d'algunes zones com l'extrem N. El baix relleu de l'extrem S permet major aportació d'humitat per part de l'onatge procedent del SE, cosa que s'ha observat a la zona S de l'àrea d'estudi com la zona més favorable pel desenvolupament de les colònies de cianòfits. D'altra banda, la important fracturació que presenta el terreny és un clar control sobre el desenvolupament i localització de formes. Les zones més fracturades presenten majors graus de desenvolupament de les formes ja que són un factor de conservació de la humitat, i a més a més, el desenvolupament de les colònies de cianòfits tendeix a seguir clarament la fracturació. S'han observat gradients en sentit longitudinal a la zona d'estudi pel que fa a les característiques morfomètriques de les formes. En sentit S-N se pot destacar una reducció de la cobertura de coalescència o la densitat de microformes, tot i que a la part central de l'àrea d'estudi els valors són sensiblement menors que als extrems.

El present treball ha intentat oferir una visió preliminar de la qual partia; entendre el perquè i com es colonitza la roca, així com la identificació d'aquells aspectes ambientals que controlen els processos biològics i per tant les formes associades.

Bibliografia

- BALAGUER, P. 2005. *Tipus i evolució de les costes rocoses de Mallorca*. Tesis Doctoral. Universitat de les Illes Balears. Palma: 373
- BALAGUER, P.; FORNÓS, J.J.; PONS, G.X.; GÓMEZ-PUJOL, L. 2007. "Movimientos de masas, disgregación granular y bioerosión en la costa rocosa". In: FORNÓS, J.J.; GINÉS, J.; GÓMEZ-PUJOL, L. (eds.) *Geomorfología Litoral: Migjorn y Llevant de Mallorca*. Mon. Soc. Hist. Nat. Balears, 15: 137-152
- COOMBES, M.A.; NAYLOR, L.A.; THOMPSON, R.C.; ROAST, S.D.; GÓMEZ-PUJOL, L.; FAIRHURST, R.J. 2010. "Colonisation and weathering engineering materials by marine microorganisms: a SEM study". *Earth Surface Processes and Landforms*, DOI: 10.1002/esp.2076.

- DANIN, A.; GERSON, R.; MARTON, K.; GARTY, J. 1982. "Patterns of limestone and dolomite weathering by lichens and blue-green algae and their palaeoclimatic significance". *Palaeogeography, palaeoclimatology, palaeoecology*. 37: 221-233
- DOEHNE, E. 2002. "Salt weathering: a selective review". In: SIEGISMUND, S.; WEISS, T.; VOLLBRECHT, A. (eds.). *Natural stone, weathering phenomena, conservation strategies and case studies*. London. Geological Society. Special Publications, 205: 51-64
- FINKL, C.W. 2004. "Coastal classification: systematic approaches to consider in the development of a comprehensive scheme". *Journal of Coastal Research*, 1. Vol. 20: 166-213.
- FORD, D.; WILLIAMS, P. 2007. *Karst Hydrogeology and Geomorphology*. Chichester. Ed. Wiley: 562
- FORNÓS, J.J. et al. 2006. "The role of biological processes and rates of downweathering due to grazing organisms on Mallorcan carbonate coasts (western Mediterranean)". *Z. Geomorph. N.F. Suppl.-Vol.* 144: 161-181
- 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. 2006. *Patrons, Taxes i Formes d'Erosió a les Costes Rocoses Carbonatades de Mallorca*. Tesi Doctoral. Universitat de les Illes Balears: 234
- GÓMEZ-PUJOL, L. 2006. "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"". *ENDINS*, 30: 121-134
- GÓMEZ-PUJOL, L.; FORNÓS, J.J. 2009. "Coastal karren in the Balearic Islands". In: GINÉS, A. et al. (eds.). *Karst rock features. Karren sculpturing*. Ljubljana. Ed. Založba ZRC Publishing: 487-502

- GORBUSHINA, A. A.; KRUMBEIN, W.E. 2000. "Subaerial microbial mats and their effects on soil and rock". In: RIDING, R.E.; AWRAMIK, S.M. (eds.) *Microbial Sediments*. Berlin. Ed. Springer: 161-170
- HOPPERT, M.; BERKER, R.; FLIES, C.; KÄMPER, M.; POHL, W.; SCHNEIDER, J.; STRÖBEL, S. 2002. "Biofilms and their extracellular environment on geomaterials: methods for investigation down to nanometre scale". In: SIEGISMUND, S.; WEISS, T.; VOLLBRECHT, A. (eds.). *Natural stone, weathering phenomena, conservation strategies and case studies*. London. Geological Society. Special Publications, 205: 207-215
- HOPPERT, M.; FLIES, C.; POHL, W.; GÜNZL, B. SCHNEIDER, J. 2004. "Colonization strategies of lithobiontic microorganisms on carbonate rocks". *Environmental Geology*, 46: 421-428.
- ITGE. 1991. *Mapa geològic 1:50.000. ARTÀ*. Hoja 672
- JOHANSSON, M.; MIGON, P.; OLVMO, M. 2001. "Development of joint-controlled rock basins in Bohus granite, SW Sweden". *Geomorphology*, 40: 145-161.
- JONES, B. 2000. "Microbial sediments in tropical karst terrains: a model based on the Cayman Islands". In: RIDING, R.E.; AWRAMIK, S.M. (eds.) *Microbial Sediments*. Berlin. Ed. Springer: 171-178
- MOTTERSHEAD, D.; GORBUSHINA, A.; LUCAS, G.C; WRIGHT, J. 2003. "The influence of marine salts, aspect and microbes in the weathering of sandstone in two historic structures". *Building and Environment*, 38: 1193-1204
- NAYLOR, L.A.; VILES, H.A. 2002. "A new technique for evaluating short-term rates of coastal bioerosion and bioprotection". *Geomorphology*, 47: 31-44
- NAYLOR L.A., STEPHENSON, W.J., TRENHAILE, A.S. 2009. "Rock coast geomorphology: Recent advances and future research directions". *Geomorphology*, 114: 3-11.
- 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.

- PETHICK, J. 1984. *An Introduction to Coastal Geomorphology*. London. Ed. Arnold: 260
- POHL, W.; SCHENEIDER, J. 2002. "Impact of endolithic biofilms on carbonate rock surfaces". In: SIEGISMUND, S.; WEISS, T.; VOLLBRECHT, A. (eds.). *Natural stone, weathering phenomena, conservation strategies and cas estudies*. London. Geological Society. Special Publications, 205: 177-194
- ROSSELLÓ, V.M.; BALAGUER, P.; FORNÓS, J.J.; GINÉS, J.; GÓMEZ-PUJOL, L.; PARDO-PASCUAL, J.E.; SEGURA, F. 2007. "El modelado de la costa rocosa oriental de Mallorca: macro, meso y microformas". In: FORNÓS, J.J.; GINÉS, J.; GÓMEZ-PUJOL, L. (eds.) *Geomorfología Litoral: Migjorn y Llevant de Mallorca*. Mon. Soc. Hist. Nat. Balears, 15: 153-172.
- SERVERA, J. 2004. *Geomorfologia de les Illes Balears*. Palma. Ed. Documenta Balear: 88.
- SMITH, B.J.; TURKINGTON, A.V.; WARKE, P.A.; BASHEER, P.A.; McALISTER, J.J.; MENEELY, J.; CURRAN, J.M. 2002. "Modelling the rapid retreat of building sandstones: a case study from a polluted maritime environment". In: SIEGISMUND, S.; WEISS, T.; VOLLBRECHT, A. (eds.). *Natural stone, weathering phenomena, conservation strategies and cas estudies*. London. Geological Society. Special Publications, 205: 347-362
- SPENCER, T.; VILES, H. 2002. "Bioconstruction, bioerosion and disturbance on tropical coasts: coral reefs and rocky limestone shores". *Geomorphology*, 48: 23-50
- SUNAMURA, T. 1992. *Geomorphology of Rocky Coasts*. Chichester. Ed. Wiley: 302
- TRENHAILE, A.S. 2002. "Rock coasts, with particular emphasis on shore platforms". *Geomorphology*, 48: 7-22
- VILES, H.A. 1987. "Blue-green algae and terrestrial limestone weathering on Aldabra atoll: an SEM and light microscope study". *Earth Surface Processes and Landforms*, 12: 319-330.
- VILES, H.A.; MOSES, C.A. 1998. "Experimental production of weathering nanomorphologies on carbonate stone". *Quarterly Journal of Engineering Geology*, 31: 347-357.

VILES, H. 2002. "Implications of future climate change for stone deterioration". In: SIEGSMUND, S.; WEISS, T.; VOLLBRECHT, A. (eds.). *Natural stone, weathering phenomena, conservation strategies and cas studies*. London. Geological Society. Special Publications, 205: 407-418

WOODROFFE, C.D. 2003. *Coasts. Form, process and evolution*. Cambridge. Ed. Cambridge University Press: 623