

EL RILLENKARREN: UN TIPUS PARTICULAR DE BIOCARST? Primeres dades

per Lluís Fiol*, Joan Fornós** i Àngel Ginés***

Resumen

Análisis químicos y observaciones microscópicas realizadas a partir de rocas con lapiaz han permitido demostrar que el arranque de pequeñas partículas calizas es uno de los principales procesos que están implicados en el crecimiento de las estrias de lapiaz (*Rillenkarrren*). Este tipo de remoción mecánica de partículas calizas se produce a causa del impacto de las gotas de lluvia, pero su efecto se ve incrementado debido a que previamente numerosas células algales han corroído la superficie calcárea debilitando su estructura cristalina. Según parece, estas frágiles micromorfologías de origen biokárstico son fundamentales en el desarrollo de las estrias de lapiaz, añadiéndose a los bien conocidos controles físico-químicos que intervienen en la formación de una morfología kárstica de disolución tan característica como lo es el *Rillenkarrren*.

Abstract

Chemical data and microscopy have shown that removal of small limestone particles is one of the most significant processes involved in the growth of *Rillenkarrren*. This kind of mechanical detachment is caused by the impact of rain drops but their effect is greatly increased when algae cells have previously corroded the surface of the limestone, weakening its crystalline structure. These fragile micromorphologies of biokarstic origin are fundamental in the development of *Rillenkarrren*, contributing to the well-known physico-chemical controls involved in the formation of karstic dissolutional morphologies as characteristic as those of *Rillenkarrren*.

Introducció

Encara que els processos que donen origen a les estries de «lapiaz» (*Rillenkarrren*) no són de moment del tot coneguts, diversos autors han demostrat, també amb mètodes experimentals, la importància decisiva que poden arribar a tenir factors com la intensitat de la pluja, el tamany de la gota, la temperatura i la viscositat de l'aigua en el desenvolupament de les estries de «lapiaz». Està amplament assumit a la literatura científica que aquesta morfologia es genera en el moment de l'impacte de les gotes de pluja sobre la roca i que en aquestes condicions només factors-químics poden explicar el seu creixement i les seves ca-

racterístiques morfomètriques (BÖGLI, 1960; GLEW, 1977; BÖGLI, 1980; JENNINGS, 1985; FORD & LUNDBERG, 1987; FORD & WILLIAMS, 1989).

Recents observacions ens han permès detectar que part del carbonat càlcic que és retirat per l'aigua que impacta sobre el *Rillenkarrren* prové de l'arrossegament de petites partícules que són arrencades de la roca i que apareixen associades a cèl·lules algals. En efecte, a conseqüència de les anàlisis d'aigua de pluja i d'escorrentia sobre roques colonitzades per líquens endolítics i no colonitzades, que s'han duit a terme durant 30 mesos (Gener 88 - Juny 90), vàrem observar les diferències entre filtrats de les aigües recollides després de les pluges, de tal manera que els procedents de les roques no colonitzades presentaven sempre una coloració més obscura (Figura 1).

Amb posterioritat començarem un mostreig siste-

* Dept. Biologia Ambiental (Laboratori de Botànica).

** Dept. Ciències de la Terra.

*** Federació Balear d'Espeleologia; Laboratori d'Ecologia.

Universitat de les Illes Balears, carretera de Valldemossa km. 7.5, E-07071 Palma de Mallorca.

màtic consistent a fer passar aigua destil·lada per damunt les roques esmentades a la fi d'estandaritzar al màxim el mètode per a la recollida de dades, així com realitzar mesures d'alcalinitat successives de les diferents mostres, ja que observarem viratges repetits en conservar-les dins recipients ben tancats, la qual cosa faria suposar la presència d'una fracció particulada. Per aquest fet les observacions de tipus químic es van complementar amb observacions microscòpiques de les citades partícules i dels organismes acompanyants.

Els resultats obtinguts vendrien a confirmar un possible mecanisme, controlat biològicament pel creixement d'algues microscòpiques, mitjançant el qual es produirien, per corrosió, partícules calcàries amb una cohesió menor, que podrien ser disgregades en darrera instància per l'impacte mecànic de les gotes de pluja.

Suposant que l'activitat metabòlica de les algues, que creixen en condicions extremes sobre les estries (*rills*), sigui la responsable de la microcorrosió que debilita l'estructura cristal·lina de la calcària (possibilitant el despeniment de les partícules), ens trobariem davant d'un cas particular de biocarst (VILES, 1984; TRUDGILL, 1985), fins i tot en un context que teòricament depèn de factors físico-químics.

Metodologia

La metodologia emprada per tal de resoldre la hipòtesi plantejada ha estat doble. Per una banda l'estudi de la part particulada resultant del filtrat de les aigües del rentat d'una mateixa àrea de roca calcària amb *Rillenkarren* (RK) i de roca calcària amb una superfície totalment polida (RP). Per altra banda, l'anàlisi química de les aigües d'escorrentia per tal de quantificar els valors de carbonats dissolts i les seves característiques físico-químiques.

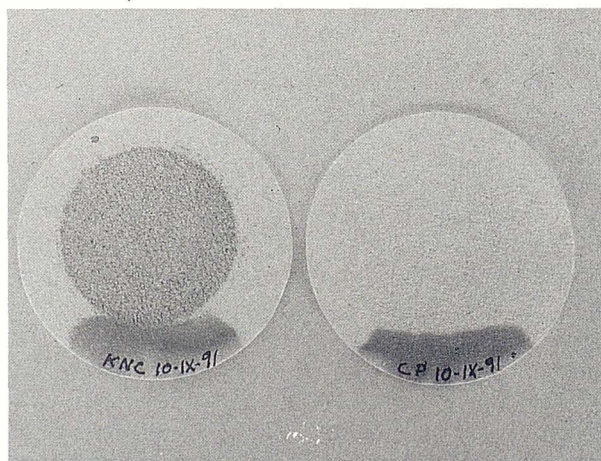


Figura 1: Aspecte que presenten els filtres després del filtratge de les mostres de calcària amb *Rillenkarren* (RK) i calcària polida (RP).

Figure 1: Appearance of filtration from limestone with *Rillenkarren* (RK) and when polished (RP).

El mètode emprat per a aconseguir aigües d'escorrentia a partir d'aigua destil·lada ha consistit a simular una pluja amb 500 ml d'aigua destil·lada des de 40 cm d'altura amb l'ajuda d'una botella de plàstic de les utilitzades al laboratori.

Les primeres proves es feren a l'exterior, aïllades de la influència directa de la pols del sòl; ja fos mitjançant l'aigua de la pluja, o amb la utilització d'aigua destil·lada en les primeres 24 h després de pluges successives. Per evitar la possible contaminació per pols calcària dels voltants, a partir del mes de maig del 91 es va utilitzar una cambra climàtica en condicions controlades (temperatura entre 18-22°C, humitat 90% i 14 h 30 min de llum diària). Cada dia es va polvoritzar (15 ml/dia) amb una solució que en cap cas presentava una alcalinitat superior de 2 mg/l.

De l'aigua d'escorrentia recollida se n'agafava una mostra de 250 ml a partir de la qual es mesurava el pH, conductivitat i alcalinitat. Apuntat el valor observat en les valoracions, es guardava la mostra dins d'un recipient tancat amb tap de rosca. Al dia següent, en cas d'haver-se produït un canvi de coloració es tornava a mesurar l'alcalinitat. L'operació es repetia tantes vegades com viratges tenguessin lloc. La resta de la mostra es filtrava utilitzant filtres Whatman GF/C (0.4 µm).

Amb el material depositat en els filtres es van efectuar observacions i mesures emprant una lupa binocular, un microscopi òptic i un microscopi electrònic d'escandallatge. En alguns casos es van realitzar tincions amb vermell d'Alizarina per tal d'identificar les partícules carbonatades. També es va emprar una microsonda per a efectuar anàlisis semiquantitatives mineralògiques de les partícules.

També van ser preparats fragments de les roques citades per a observar-ne en detall la superfície així com les zones de fractura.

Resultats i discussió

Quan es mesuren alcalinitats a l'aigua d'escorrentia únicament es valoren els carbonats dissolts. Els viratges successius que presenten les respectives mostres indiquen la presència d'una fracció particulada que no entra en aquesta primera valoració (Figura 1) i que queda explicitada en la Taula 1 (CP). A la Figura 3 es representen les mesures efectuades de les partícules d'aquesta fracció i que comentarem més tard. Els respectius viratges tenen lloc a causa de l'acidificació del medi pel mètode d'anàlisi emprat i que suposa la subsaturació d'aquest amb la dissolució posterior de les diferents partícules.

Per tal de rebutjar la possibilitat que els viratges tenguessin un altre origen (contaminació, etc.), ocasionalment es va utilitzar l'aigua filtrada per mesurar novament l'alcalinitat seguint el mateix procés ja indicat.

Com ja hem apuntat, els valors d'alcalinitat de l'aigua d'escorrentia a **RK** els separen en tres blocs com a conseqüència de les diferents condicions en què s'ha duit a terme l'experimentació.

De l'observació dels resultats de **RK** carbonats dissolts (CD) (Taula 2) es desprèn una clara diferència entre els valors obtinguts a partir de l'aigua de pluja i la resta dels valors amb l'aigua destil·lada. Aquest fet pot explicar-se pel major grau d'agressivitat que presenta l'aigua de pluja com a conseqüència de les substàncies que du en dissolució i que es fa evident en els seus valors de conductivitat (Taula 1). A partir de la utilització d'aigua destil·lada es nota, no únicament una disminució en els valors de CD (Taula 2) sinó també una estabilització significativa.

També són prou remarcables les diferències quant als valors de **RK** carbonats particulats (CP) obtinguts (Taula 2) que atribuïm al fet d'estandaritzar la intensitat i l'impacte, i afavorir les condicions de creixement de les algues, el que suposa l'increment de la seva activitat corrosiva damunt la roca, a partir de la utilització de la cambra climàtica.

L'estudi del material particulat resultat del filtratge mostra la presència de la cianòfita croococal *Chroococcus minutus* (Kütz.) Näg. (Figura 2), que queda confirmada en els raspats efectuats a diferents roques amb *Rillenkarren* tant en l'observació al microscopi òptic com en el microscopi electrònic d'escandallatge. Aquestes algues cianofícies estan associades a peti-

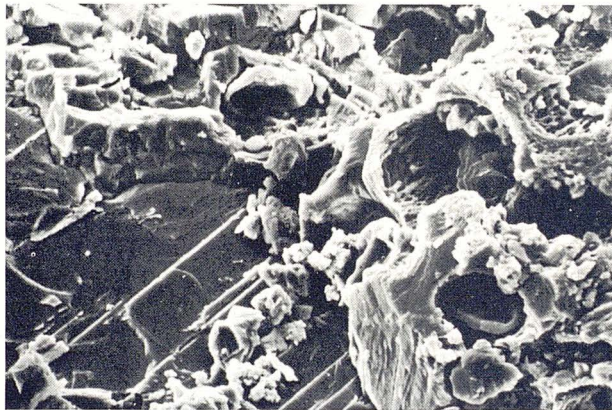
tes cavitats pseudocilíndriques resultat de la seva activitat i que denoten un hàbitat des d'epilític a endolític (Figura 2).

Com apunten POMAR *et al.* (1975) des del punt de vista petrogràfic aquesta acció biològica es caracteritza per la destrucció de la textura original com a conseqüència de l'acció perforant a causa de l'activitat corrosiva. Aquesta origina la pèrdua de la cohesió intercrystal·lina i dóna lloc a una micritització i microesparització intensa.

L'acció d'aquestes algues cianofícies, acompanyada probablement d'altres organismes, facilita el posterior descalçament de les partícules calcàries per l'impacte de les gotes d'aigua.

L'anàlisi de la gràfica (Figura 3) del tamany de les partícules procedents del filtrat, mostra una corba bimodal amb un pic molt pronunciat màxim d'ordre «micrita» (<5µm) i un altre punt màxim molt menys important (48µm) i que correspon a agregats. Les partícules situades dins de l'interval (0-20µm) representen la fracció més abundant i corresponen a fragments «individuals» resultat del procés de la micritització dels cristalls de calcita. La fracció més gruixuda presenta uns intervals més amples (20-75µm) i que com hem dit, corresponen a agregats fortament micrititzats i que van acompanyats d'algues (Figura 4).

La utilització de la roca polida es va fer amb la intenció de demostrar la importància decisiva dels microorganismes en el procés, i contrastar amb l'efecte

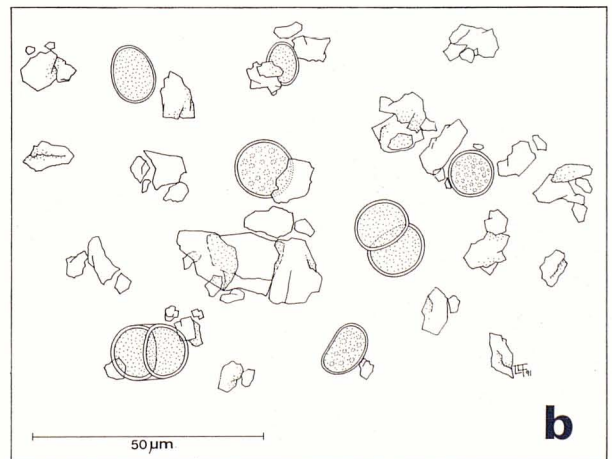


a



Figura 2: **a)** Observació de les algues cianofícies al microscopi electrònic d'escandallatge on es remarca l'acció corrosiva damunt la roca. Escales gràfiques: 20µm i 10µm. **b)** Dibuix de detall de *Chroococcus minutus* (Kütz.) Näg.

Figure 2: **a)** SEM showing corrosive action of blue-green algae on the rock. Scale bars: 20µm and 10µm. **b)** Drawing of details of *Chroococcus minutus* (Kütz.) Näg.



b

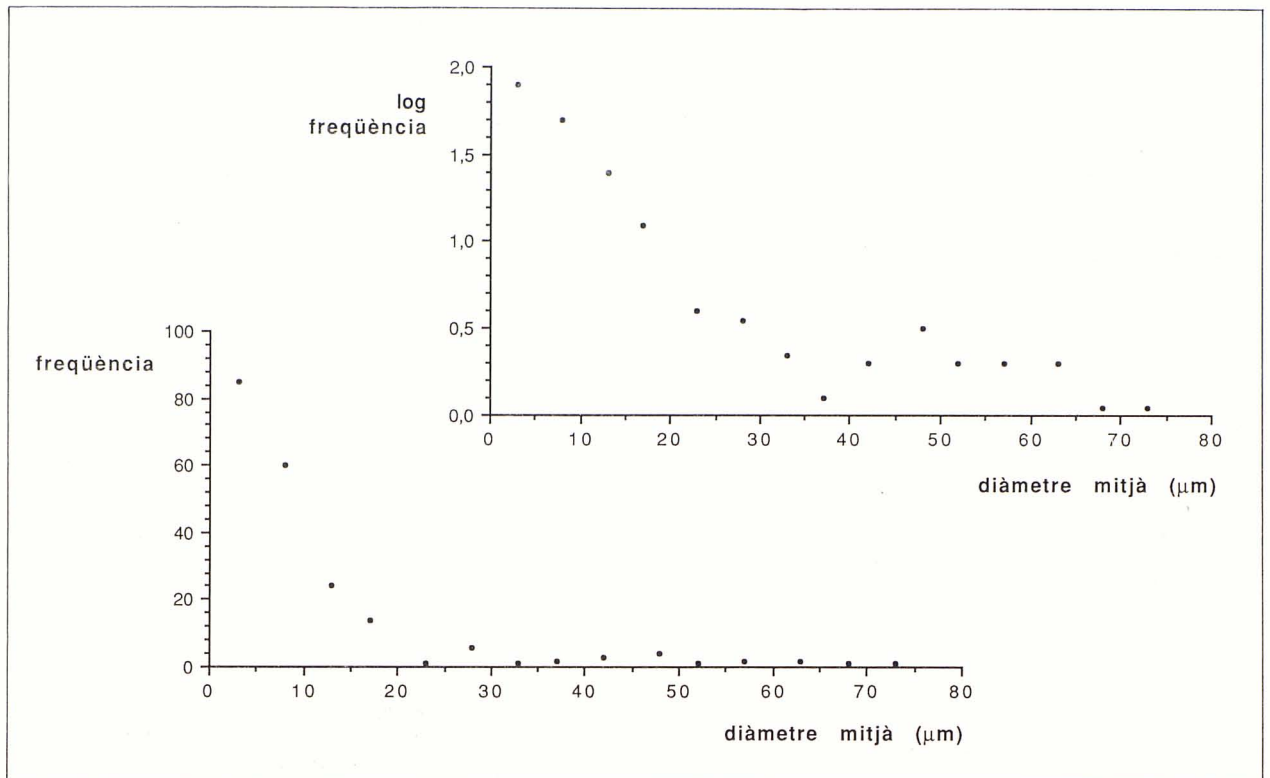


Figura 3: Gràfica de freqüències de les mesures efectuades sobre les partícules obtingudes en el filtratge. La freqüència en ordenades se representa de forma normal i logarítmica.

Figure 3: Frequencies of size fractions of filtered particles. Ordinate values are arithmetic and logarithmic.

mecànic de l'impacte de la gota (BRANDT, 1990), per tal d'eliminar la idea que tot el procés obeís tan sols a processos de tipus físico-químic.

Com s'observa a la Taula 2, els valors de la primera determinació de l'alcalinitat referits a una mateixa àrea són significativament més baixos (en quasi 1 ordre de magnitud) en el cas de la roca polida. La major alcalinitat enregistrada en el cas de la **RK** s'explica per l'increment de superfície (microtopografia més porosa) originada per l'activitat biològica (Figura 5a), mentre que a la roca polida (Figura 5b), com a conseqüència del tractament mecànic, presenta una menor superfície de contacte; encara que la petita fracció particulada que permet en la majoria dels casos una segona valoració, es deu a l'efecte mecànic de l'impacte de la gota sobre la textura resultant del polit (Figura 5b). S'ha de remarcar que en el cas de **RP** aquesta segona o, fins i tot, tercera valoració, no supera en cap cas 1mg/l, i dona per tant valors molt inferiors als de la **RK** (Taula 1).

Una primera aproximació de la importància quantitativa que representa el procés esmentat, es pot obtenir a partir dels resultats que tenim fins ara, referint els valors tant de carbonats dissolts (CD) i els totals (T) a la superfície de les roques que hem emprat. Així ens resulta que en el cas de les condicions ambientals (pluja) tenim un valor de CD de 11.56 g/m²/any, uns valors de CP de 1.13 g/m²/any que donen un total (T) de 12.69 g/m²/any. En el cas de les condicions controlades (cambra climàtica) tenim per a la **RK**

un valors de CD de 1.58 g/m²/any i de CP de 1.60 g/m²/any i T de 3.18 g/m²/any; mentre que per a la **RP** resulten valors de CD de 0.36 g/m²/any, CP de 0.12 g/m²/any i T de 0.48 g/m²/any.

Conclusions

Dins del procés de formació de la típica morfologia càrstica de dissolució que és el *Rillenkarren*, hi intervé també el procés de descalçament mecànic de fragments de la roca causat per l'impacte de les gotes de pluja. Això ocasiona damunt la roca carbonatada una pèrdua no tan sols d'una fracció dissolta sino també d'una fracció particulada.

La fracció particulada esdevé més important com a conseqüència de l'acció dels microorganismes, que provoquen la micritització de la roca, debilitant l'estructura cristal·lina, i afavoreixen la desintegració mecànica per l'impacte de les gotes de pluja.

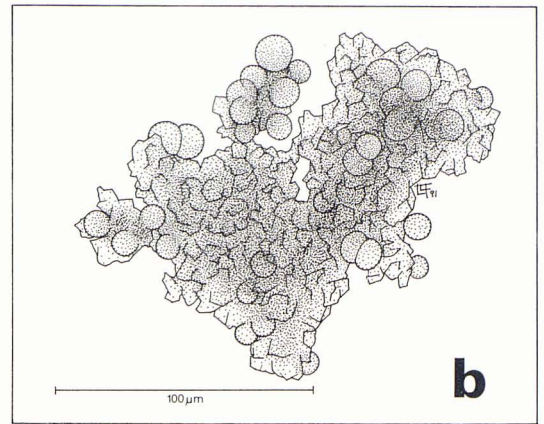
En les mostres estudiades de *Rillenkarren*, l'única espècie identificada fins ara ha estat la cianofícea *Chroococcus minutus* (Kütz.) Näg., responsable del procés de microcorrosió de la superfície de la roca.

L'acció biològica, endemés, és la responsable de la formació d'una microtopografia, que origina un fort increment de superfície i afavoreix un augment de la fracció de carbonats dissolts.

Les condicions en què s'ha desenvolupat l'experiència (cambra climàtica) mostren que la fracció de



a



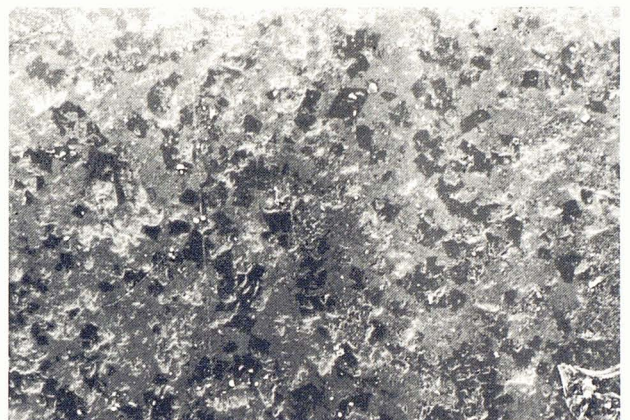
b

Figura 4: **a)** Imatge al microscopi electrònic d'un dels agregats que mostra la presència d'algues cianofícies. Escala gràfica: 100μm. **b)** Dibuix interpretatiu.

Figure 4: **a)** SEM of an aggregate showing blue-green algae. Scale bar: 100μm. **b)** Drawing of the same.



a



b

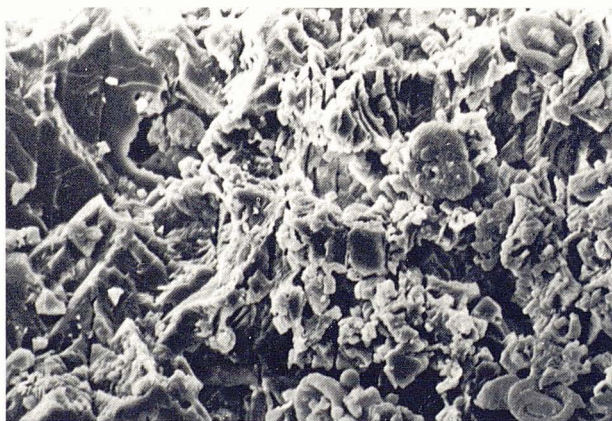


Figura 5: **a)** Fotografies al microscopi electrònic on s'observa l'increment de superfície deguda a l'acció biològica (RK). Escales gràfiques: 100μm i 20μm. **b)** Detall de la superfície polida a la mostra RP, on s'observa una certa irregularitat que pot ser l'origen d'una petita quantitat de carbonats particulats. Escales gràfiques: 100μm i 10μm.

Figure 5: **a)** SEM showing surface area increase due to biological action (RK). Scale bars: 100μm and 20μm. **b)** Detail of polished surface of sample RP, showing irregularities which could be the incipience of a small quantity of carbonated particles. Scale bars: 100μm and 10μm.

Mostra	ALCALINITAT (mg/l)								pH			CONDUCTIV. (µS)			
	Data	CD	RK			CD	RP		H ₂ O*	RK	RP	H ₂ O	RK	RP	H ₂ O
			1	CP	3		1	CP							
140490	34,0	2,0	1,0	0,0	,	,	,	(1,0)	7,5	,	4,9	97,4	,	16,4	
210490	44,0	5,0	0,0	0,0	,	,	,	(2,5)	7,7	,	5,7	177,1	,	24,1	
250490	27,0	4,5	0,0	0,0	,	,	,	(5,5)	7,7	,	6,5	110,9	,	54,9	
290490	38,0	2,5	0,0	0,0	,	,	,	(7,0)	7,6	,	6,4	136,2	,	60,8	
010590	42,0	2,0	0,0	0,0	,	,	,	(3,0)	7,7	,	6,1	161,7	,	70,2	
050690	25,5	1,5	0,0	0,0	,	,	,	(1,5)	7,4	,	5,1	65,0	,	13,6	
151190	10,0	10,0	4,0	0,0	,	,	,	0,5	8,6	,	5,0	23,4	,	1,5	
280191	8,0	1,0	0,0	0,0	,	,	,	1,0	8,5	,	5,0	19,3	,	1,3	
070591	11,0	7,0	1,5	0,0	,	,	,	1,0	8,5	,	4,7	19,2	,	1,2	
300591	12,0	8,0	4,0	0,5	3,0	0,0	0,0	1,0	8,7	5,9	4,7	24,9	7,4	1,5	
130691	8,5	2,5	0,5	0,0	4,0	0,0	0,5	2,5	8,3	6,3	5,5	15,6	8,7	4,0	
010791	8,5	2,5	0,0	0,0	3,5	0,0	0,0	1,5	8,4	6,1	5,4	12,1	8,3	1,5	
160791	9,0	3,5	0,8	0,0	2,5	0,5	0,0	1,0	8,4	6,0	4,6	15,9	6,1	1,6	
050891	10,0	12,0	2,0	0,5	3,0	0,5	0,0	0,8	8,6	6,2	5,0	17,4	6,6	1,4	
260891	9,0	6,5	2,0	1,0	2,3	0,5	0,5	0,5	8,4	6,1	4,8	18,7	6,4	2,0	
100991	8,5	9,0	1,0	0,0	2,5	1,0	0,3	0,8	8,4	6,2	4,8	14,6	6,8	1,2	
250991	9,0	8,0	3,0	0,5	2,5	0,5	0,5	0,8	8,3	6,0	4,6	16,4	6,6	1,1	

(*) Els valors entre parèntesi (,) corresponen a aigua de pluja. Tots els valors d'alcalinitat s'expressen en mg/l.

RK - roca carstificada, RP - roca polida, H₂O - aigua destil·lada, CD - Carbonats dissolts, CP - carbonats particulats (1, 2 i 3 que corresponen a les successives valoracions).

Taula 1: Valors de l'anàlisi d'alcalinitat, pH i conductivitat de les mostres d'aigua. La separació horitzontal de les mostres està en funció de les diferents condicions experimentals. El primer bloc correspon a aigües de pluja, el segon a aigua destil·lada a l'exterior i el tercer a aigua destil·lada en cambra climàtica.

Table 1: Alkalinity, pH and conductivity of water samples. The horizontal distance between samples is a function of the varying experimental conditions. The first set corresponds to rainwater, the second to distilled water kept outdoors and the third to distilled water in a growth cabinet.

Mostra	ALCALINITAT (mg/l)						
	Data	CD*	RK		CD	RP	
			CP	T		CP	T
140490	33,0	3,0	36,0	,	,	,	
210490	41,5	5,0	46,5	,	,	,	
250490	21,5	4,5	26,0	,	,	,	
290490	31,0	2,5	33,5	,	,	,	
010590	39,0	2,0	41,0	,	,	,	
050690	24,0	1,5	25,5	,	,	,	
151190	9,5	14,0	23,5	,	,	,	
280191	7,0	1,0	8,0	,	,	,	
070591	10,0	8,5	18,5	,	,	,	
300591	11,0	12,5	23,5	2,0	0,0	2,0	
130691	6,0	3,0	9,5	1,5	0,5	2,0	
010791	7,0	2,5	9,5	2,0	0,0	2,0	
160791	8,0	4,3	12,3	1,5	0,5	2,0	
050891	9,2	14,5	23,7	2,0	0,5	2,5	
260891	8,5	9,5	18,0	2,0	1,0	3,0	
100991	7,7	10,0	17,7	1,5	1,3	2,8	
250991	8,2	11,5	19,7	1,7	1,0	2,7	

Taula 2:

Valors reals de l'anàlisi d'alcalinitat de les mostres d'aigua. La separació horitzontal igual que en el cas de la Taula 1.

Table 2:

Net values for alkalinity of water samples. Horizontal distance between samples as in Table 1.

(*) Valor resultant de la diferència entre les columnes RK CD i H₂O* de la Taula 1. RK - roca carstificada, RP - roca polida, CD - Carbonats dissolts, CP - Σ de carbonats particulats (Taula 1), T - total (CD+CP).

Mostra	ALCALINITAT (mg/l)															
	RK CD				RK CP				RP CD				RP CP			
	n	Σx	\bar{x}	∂n	Σx	\bar{x}	∂n	%CP/T	n	Σx	\bar{x}	∂n	Σx	\bar{x}	∂n	%CP/T
Aigua de pluja	6	190,0	31,7	7,24	18,5	3,1	1,27	8,9								
Aigua destil.lada	4	37,5	9,4	1,47	36,0	9,0	5,04	48,9								
Cambra climàtica	7	54,6	7,8	0,96	55,3	7,9	4,30	50,3	8	14,2	1,8	0,23	4,8	0,6	0,44	25,3

Tots els valors d'alcalinitat s'expressen en mg/l.

RK - roca carstificada, **RP** - roca polida, CD - Carbonats dissolts, CP - carbonats particulats, T - total (CD+CP).

Taula 3: Valors estadístics globals dels resultats obtinguts i percentatge respecte del total de la part de carbonats particulats.

Table 3: Global statistical values of results and percentatge of particulate carbonates with respect to the total.

carbonats particulats en el procés de formació del *Rillenkarren*, pot arribar a tenir la mateixa importància, o fins i tot superar, el volum de carbonats dissolts.

De tot el que s'ha exposat fins ara queda clara la forta influència que representa l'activitat dels microorganismes sobre els processos de carstificació.

Amb aquest avanç no es tracta d'extrapolar els resultats obtinguts al que creim que passa a la natura, sinó posar esment a un fenomen encara mal conegut, però d'importància capital per a poder explicar amb precisió el procés de dissolució a la superfície del carst.

Agraïments

El nostre agraïment més sincer per la col·laboració del Dr. Ferran Hierro del Servei de Microscopia de la U.I.B. en les observacions al microscopi electrònic d'escandallatge, a la Dra. Mariona Hernández per la determinació de la cianofíceia i a la Sra. Carme Vila i al Dr. Enric Descals per solucionar els nostres entrebancs lingüístics. Al Sr. Enric Massutí per la cessió de una de les mostres (**RP**) i a Joan M. Carmona l'ajuda en les qüestions de infraestructura.

Bibliografia

- BÖGLI, A. (1960): «Kalklösung und Karrenbildung». *Zeitschrift für Geomorphologie*, N.F. suppl. 2: 4-21. Berlin.
- BÖGLI, A. (1980): «Karst Hydrology and Physical Speleology». Springer-Verlag. 284 pàgs. Berlin.
- BRANDT, C.J. (1990): «Simulation of the size distribution and erosivity of raindrops and throughfall drops». *Earth Surface Processes and Landforms*, 15: 687-698.
- FORD, D.C. & LUNDBERG, J. (1987): «A review of dissolutional rills in limestone and other soluble rocks». *Catena* suppl. 8: 119-140. Braunschweig.
- FORD, D.C. & WILLIAMS, P.W. (1989): «Karst Geomorphology and Hydrology». Unwin Hyman Ltd. 601 pàgs. Londres.
- GLEW, J.R. (1977): «Simulation of rillenkarren». *Proc. 7th Internatl. Congress Speleol., Sheffield*, 218-219.
- JENNINGS, J.N. (1985): «Karst Geomorphology». Basil Blackwell Ltd. 293 pàgs. Oxford.
- POMAR, L., ESTEBAN, M., LLIMONA, X. i FONTARNAU, R. (1975): «Acción de líquenes, algas y hongos en la Telodiagénesis de las rocas carbonatadas de la zona litoral prelitoral catalana». *Instituto de Investigaciones Geológicas*, 30: 83-117.
- TRUDGILL, S.T. (1985): «Limestone geomorphology». Longman. Londres.
- VILES, H.A. (1984): «Biokarst: review and prospect». *Progress in Physical Geography*, 8(4): 523-542. Londres.