

Note preliminari sull'idrodinamica del sistema carsico di St. Paul (Palawan, Filippine)

Paolo FORTI, Leonardo PICCINI, Guido ROSSI & Roberto ZORZIN

Riassunto

Il sistema carsico di St. Paul si apre sulla costa settentrionale dell'isola di Palawan: esso è caratterizzato da un lato dall'esistenza al suo interno di un grande fiume e dall'altro dal fatto che le maree si risentono sino ad oltre 5 km dal suo ingresso a mare.

Lo scopo di questo studio preliminare è stato quello di evidenziare i rapporti relativi esistenti tra l'acqua di mare e quella dolce di infiltrazione meteorica anche e soprattutto in funzione speleogenetica.

Nel presente lavoro, dopo aver brevemente inquadrato la cavità dal punto di vista geografico, geologico e geomorfologico, vengono riportati i dati ottenuti relativamente alle caratteristiche delle varie masse d'acqua presenti. Infine, sulla base di alcuni dati sperimentali di corrosione, si discute l'efficienza del meccanismo di corrosione per miscelazione nella speleogenesi di questa cavità.

Abstract

The St Paul karst system on the northern coast of the Palawan Isle is characterized by the presence of a large underground river on which tide effects are visible upstream over 5 km from the sea entrance. This preliminary study was performed to investigate the exchanges existing between salt and meteoric waters inside the cave and their speleogenetic effects.

In the present paper, after a short overlook of the geographical, geological and geomorphological settlement of the cave, the experimental data obtained by the study of the hydrodynamics of the different waters are briefly reported.

Then, on the basis of the few available data on the karst erosion inside the cave, the efficiency of the speleogenetic effect due to mixing is discussed.

Résumé

Le système karstique de St-Paul, sur la côte nord de l'île Palawan, est caractérisé par la présence d'une grande rivière souterraine sur laquelle la marée a des effets visibles jusqu'à 5 km du débouché sur la mer. Cette étude préliminaire avait pour but de rechercher les échanges entre l'eau de mer et l'eau douce dans la grotte, et leurs effets spéléogénétiques. Dans cet article, après un court aperçu des conditions géographiques, géologiques et géomorphologiques, les données expérimentales obtenues par l'étude hydrodynamique des eaux sont exposées brièvement.

Sur la base de quelques données disponibles à propos de l'érosion karstique dans la grotte, l'efficacité de l'effet spéléogénétique du mélange des eaux est discutée.

I. INTRODUZIONE

L'isola di Palawan, la più occidentale tra le isole maggiori dell'arcipelago filippino, ha una forma caratteristicamente allungata e si presenta come tagliata in due da una faglia trascorrente sinistra orientata N-S che separa il dominio metamorfico settentrionale da quello magmatico-sedimentario centro-meridionale.

Proprio in corrispondenza di questa grande faglia si erge il massiccio di St. Paul che culmina nei 1028 m del monte omonimo. Esso è costituito interamente da un calcare di età oligo-miocenica che prende il nome di St Paul Limestone (AA. Vv., 1982). L'affioramento

carbonatico ha una estensione di circa 30 km' ed appare intensamente carsificato sia in superficie che in profondità.

I fenomeni carsici superficiali si presentano molto sviluppati, con profonde depressioni ampie sino ad un chilometro (*cockpits*), doline di svariate dimensioni e accentuatissimi *karren*.

Il fenomeno carsico più noto è però costituito dall'Underground river: il fiume sotterraneo che attraversa buona parte della dorsale in senso longitudinale. L'ingresso principale di questa, che è la più grande e famosa grotta delle Filippine, si apre a

poche decine di metri dal mare sulla costa settentrionale dell'isola. Dall'ampio portale, da cui fuoriesce il fiume inghiottito circa 7 km a monte (DE Vivo *et al.*, 1990), si accede alla prima parte della grotta costituita da una grande e lunga galleria allagata le cui dimensioni aumentano procedendo verso l'interno della montagna. Alcuni vasti saloni sono da imputare a crolli che hanno messo in comunicazione l'attuale galleria con un livello superiore che rappresenta un più antico percorso del Fiume.

Dopo 4,5 km si arriva ad un vasto salone di crollo, denominato Rockpile, che sovrasta un sifone, superabile tramite una grande galleria laterale, da cui fuoriesce tutta l'acqua del fiume. Al di là il fiume prosegue per altri 3 km in una grande ed ampia galleria che in certi punti raggiunge i 70 m di larghezza e che porta al salone terminale sul cui soffitto si affaccia una galleria da cui penetra la luce del giorno da cui il nome, Daylight, datogli dai primi esploratori.

Numerose diramazioni laterali e alcuni affluenti portano lo sviluppo totale del sistema a oltre 20 km.

Uno degli aspetti di maggior interesse della grotta è senza dubbio rappresentato dal fatto che le maree si risentono all'interno di essa per circa 6 km e che pertanto la cavità è sede di imponenti fenomeni di miscelazione tra l'acqua dolce del filme sotterraneo e quella salata marina.

Scopo della spedizione del 1991 era appunto quello di cercare di studiare questi fenomeni, definendo l'evoluzione e temporale dell'idrodinamica e dell'idrochimica in vari punti della cavità e possibilmente mettere in relazione queste variazioni con i meccanismi speleogenetici che hanno portato all'evoluzione della grotta stessa. All'uopo sono stati utilizzati due strumenti in grado di misurare a cadenze fisse (15 minuti) la temperatura e la conducibilità dell'acqua, nonché un termometro ed un conducimetro normali. Gli strumenti automatici sono stati posizionati, per tempi variabili da 5 a 30 ore in varie parti della grotta, mentre gli strumenti tradizionali sono stati utilizzati durante tutte le uscite effettuate per compiere controlli e misure puntuali.

Contemporaneamente sono stati controllati costantemente i livelli di marea sia all'ingresso che in due punti della grotta (S1 e S2, Fig. 1), mentre nelle altre zone il controllo è stato solo saltuario ad opera delle squadre esplorative.

Da ultimo si sono recuperate i ciottolotti di calcare posizionate nella grotta l'anno precedente al fine di determinare l'erosione chimica nelle varie porzioni della cavità.

Nel presente lavoro vengono brevemente riportati i risultati sperimentali ottenuti e le implicazioni speleogenetiche relative.

II. L'EFFETTO DELLE MAREE

Tra gli scopi della ricerca vi era quello di determinare l'entità delle maree in vari punti della cavità per poterne quindi definire l'influenza sull'idrodinamica e sulla speleogenesi.

Per questo sono stati posizionati due misuratori di livello all'interno della cavità (S1 e S2, Fig. 1). Contemporaneamente sono state controllate direttamente a vista le variazioni che il livello dell'acqua subiva a monte del Rockpile, ogniqualvolta membri della spedizione si trovavano in tale area della cavità.

Nella settimana di permanenza la massima escursione mareale è stata di 92 cm (FER, 1991) valore che è assolutamente congruente con quello osservato al Rockpile, ove si è riscontrato una escursione sicuramente superiore agli 80 cm.

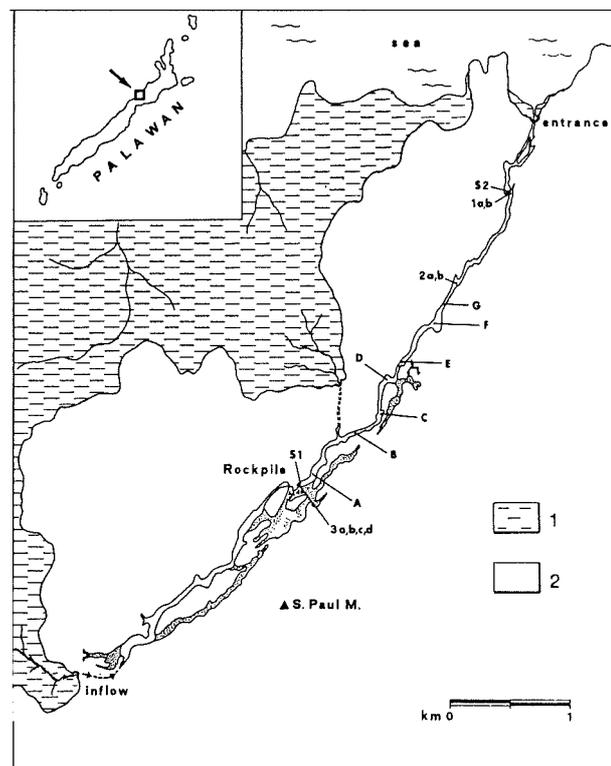


Figura 1 : Il sistema carsico di St. Paul;
1 rocce vulcaniche; 2 rocce carbonatiche. Lungo la grotta sono stati posizionati i vari punti di controllo con le stesse sigle utilizzate nel testo

Posizione	Orario locale	Ritardo	Ritardo Cumulativo
Mare aperto	15,01	---	---
Ingresso grotta	15,15	14	14
S2	15,50	35	49
S1	16,45	55	1,44

Tabella 1 : Orario di osservazione del colmo di marea nel sistema carsico di St. Paul il 22 Febbraio 1991

In pratica quindi l'effetto di marea si risente sino al Rockpile assolutamente non smorzato. A monte di questa grande frana, invece, l'effetto di marea diminuisce progressivamente da valori attorno ai 60-70 cm osservati subito dopo la frana sino a scomparire del tutto, probabilmente per effetto dell' aumento di quota del pavimento della galleria presso il punto C150. Le evidenze morfologiche poi suggeriscono che anche in presenza di maree eccezionali, queste non si risentono mai oltre il punto C170.

A monte del Rockpile, comunque, l'effetto di marea è dovuto più al tamponamento delle acque salienti rispetto al flusso costante di acqua dolce, che alla risalita di acqua marina o salmastra. Infatti poche decine di metri a monte della grande frana l'acqua ha valori di conducibilità bassi anche durante l'alfa marea.

Considerando infatti la massima marea misurata al Rockpile e valutando la quantità d'acqua che si deve esser accumulata a monte di questo per l'effetto di innalzamento di livello, si ottiene un valore di circa 7000 m³, che risulta essere dello stesso ordine di grandezza alla quantità totale d'acqua dolce entrata nel sistema per effetto del fiume (5000 metri cubi) nelle ore di risalita della marea.

D'altro canto l'esistenza di una certa salinità a monte è giustificabile con il fatto che la salita di marea inizialmente è sicuramente più rapida del tamponamento effettuato dal flusso di acqua dolce costante da monte e pertanto una certa miscela può avvenire anche se limitata alle poche centinaia di metri di galleria dopo il Rockpile. Anche se va ricordato che gran parte dell'acqua che risale il Rockpile appartiene allo strato più superficiale quasi dolce o al massimo al secondo salmastra. È stato anche possibile misurare il ritardo con cui il culmine di alfa marea dalla bocca della grotta raggiunge il Rockpile (Tab. 1).

Lo sfasamento in circa 4,5 km di grotta è risultato essere di circa un'ora e mezzo. Il dato di sfasamento tra il Rockpile e S2 è risultato esser congruente con il risultato

sperimentale della velocità di flusso in discesa. Infatti la partenza dal Rockpile è avvenuta con un ritardo di circa un'ora e il flusso discendente si è arrestato del tutto non lontano S2 dopo 4 ore 45 min, quindi con una differenza di circa 1 ora 15 min rispetto al raggiungimento teorico della balsa marea al Rockpile e meno di 20 min al punto S2. Considerati gli inevitabili errori di definizione del momento esatto di colmo e quelli dovuti al fatto che con il metodo utilizzato le bassissime velocità di flusso non erano in realtà osservabili possiamo affermare che i due test sono congruenti.

III. CARATTERISTICHE CHIMICO-FISICHE DELLE ACQUE

Dal punto di vista idrochimico la grotta di St. Paul può esser suddivisa in due distinti domini; quello a monte del Rockpile caratterizzato dalla presenza di acqua dolce meteorica, con pochi e limitati effetti di miscela con acque salate e costante flusso idrico da monte verso valle, e quello dal Rockpile sino al mare caratterizzato da imponenti effetti di miscela, da inversioni di direzione di flusso e da marcate variazioni verticali in contenuto salin.

A monte del Rockpile, se si eccettuano le prime centinaia di metri che ancora risentono in misura comunque poco rilevante di alcuni fenomeni di miscela (con tra gli 8.000 e i 3.000 m), l'acqua ha valori di conducibilità caratteristici di un'acqua dolce di origine meteorica (coud. tra 300 e 500 m). Le variazioni osservate nella conducibilità sono da mettere in relazione, con uno sfasamento di circa 8-9 ore, con le attività antropiche nel villaggio a monte del punto di inghiottimento del torrente. La temperatura non ha rivelato variazioni significative mantenendosi costante al valore di 24,9 °C.

A monte del Rockpile non sono state evidenziate variazioni verticali all'interno dell'acqua che risulta essere quindi omogenea punto per punto.

Immediatamente a valle del Rockpile la situazione cambia completamente; infatti l'acqua risulta esser sempre stratificata in tre differenti fasce, i cui comportamenti idrodinamici e parametri chimico-fisici seguono un comportamento molto diverso.

Lo strato più superficiale, dello spessore di circa 5-7 cm è risultato essere di acqua dolce (tond. variabile tra 650 e 2400 m) e con flusso quasi costante verso valle; le variazioni di temperatura e di conducibilità seguono un andamento giornaliero con la T massima sfalsata di circa mezz'ora in avanti rispetto alla C minima.

Lo strato intermedio, di spessore, valutato in 30-40 cm ha evidenziato variazioni della temperatura e della conducibilità su basi mareali; i valori della conducibilità misurati sono risultati compresi tra 3300 e 13300 m, con il massimo durante le basse maree e viceversa, indicando da un lato l'esistenza di una certa miscelazione con acqua marina ma dall'altro un meccanismo di

miscelazione non "banale". Il flusso di questo strato si inverte circa su base mareale anche se ha mostrato di avere una certa inerzia.

Lo strato inferiore ha mostrato costantemente valori di conducibilità superiori ai 20000 m, che pertanto non è stato possibile misurare esattamente, poiché erano al di fuori dell'intervallo di misura degli strumenti in nostro possesso; si tratta comunque di acque pressoché marine. La temperatura di questo strato risulta seguire un andamento analogo a quello dello strato superiore ma sfalsata di un'ora. Poco possiamo dire dei movimenti di questo strato che però sembra esser quasi fermo o in lentissimo movimento coerente con lo strato immediatamente superiore.

Questi tre strati di acque a chimismo differente si mantengono a valle ancora ben distinti per un lungo tratto anche se progressivamente il primo strato tende ad esser assimilato dal secondo.

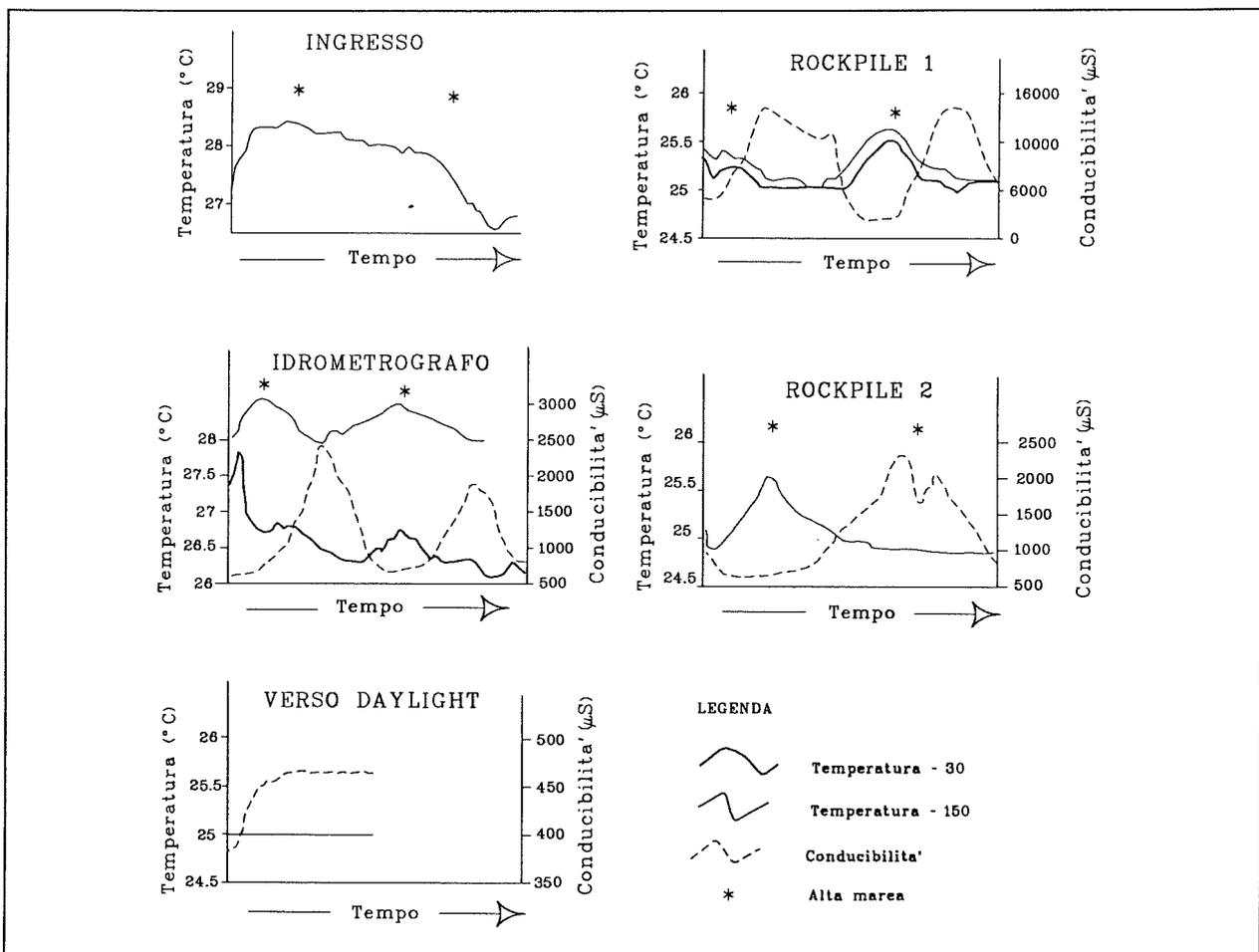


Figura 2 : Dati di temperatura e conducibilità delle acque del sistema carsico di St.Paul. La scala dei tempi corrisponde a 24 ore. Il diagramma idrometrografo è relativo al punto S2, Rockpile 1 & 2 ad S1 e verso Daylight a circa 500 metri a valle dell'inflow di Fig. 1. I valori di Rockpile 2 sono relativi ad una profondità costante nel tempo di 5 cm.

A metà strada tra S1 e S2 infatti in pratica non esiste più alcuna distinzione tra i primi due strati, che in questo punto possono essere considerati uno solo; le variazioni di conducibilità avvengono su basi mareali con valori tra 5800 e 27500 m che indicano una progressiva sempre maggior miscelazione con le acque marine; anche la temperatura ha variazioni mareali confermando il rapporto = C anche se la temperatura mostra una variabilità che in parte può dipendere anche da altri fattori quasi gli scambi termici con l'atmosfera (Fig. 2).

All'ingresso della grotta è ancora osservabile una differenza tra lo strato superiore e quello inferiore anche se le osservazioni in merito sono state fatte solo per quel che riguarda i movimenti reciproci. Dal punto di vista chimico-fisico le uniche osservazioni effettuate sono state le temperature dell'acqua dello strato più profondo, che hanno mostrato una variazione interpretabile su base giornaliera, con perturbazioni dovute al ritmo mareale che portava nella laguna antistante la grotta acqua marina, di giorno più fredda e di notte più calda per la maggiore inerzia termica del mare rispetto alla laguna stessa.

IV. L'IDRODINAMICA DEL SISTEMA

Nel complesso carsico di St. Paul scorre un fiume, che, in regime di magra (quale il periodo in cui è stato effettuato il presente studio) ha una portata di circa 200 litri/secondo; tale fiume lungo il suo percorso sotterraneo dal Rockpile al mare si miscela completamente con l'acqua marina

Lo studio del flusso in uscita della corrente superficiale è stato effettuato in contemporanea partendo dal Rockpile (S1) e dall'idrometrografo (S2) (Fig. 1). Si è atteso che la corrente invertisse il suo corso, cosa che a S1 è avvenuta con un anticipo di circa 15 minuti rispetto al massimo di marea, mentre a S2 praticamente ha coinciso con il colmo.

L'inversione della corrente al Rockpile poco prima del colmo è logica, avendosi a monte un'afflusso costante di acqua dolce che, quando la marea ha quasi terminato la sua salita ha la possibilità di cominciare a fluire verso valle.

Zona	Tempo da p.a p.	Tempo totale	Metri percorsi da punto a punto	Velocità m/minuto da punto a punto
S1	0	0		
Punto A	32	47	150	3,19
B	43	1,30	530	12,32
C	30	2,00	300	10,00
D	50	2,50	380	7,60
E	27	3,17	195	7,22
F	54	3,11	465	8,61
G	34	4,45	180	5,29
Totale metri	2200	vel. media	7,46 m/mn	
S2	0	0		
Y	2,10	2,10	210	1,62
Entrata	2,40	4,50	540	3,38
Totale metri	750	vel. media	2,59 m/mn	

Tabella 2 : Tempi e velocità di flusso osservati sperimentalmente dentro il sistema di St. Paul

Prima di analizzare i risultati è necessario dire che il metodo utilizzato per misurare la corrente (osservazione di corpi galleggianti in movimento) non ha certo permesso di ottenere una misura esatta; infatti la velocità

calcolata risulta essere sicuramente inferiore di almeno il 10-15 % rispetto a quella reale per il fatto che i corpi galleggianti tendevano ad uscire dal flusso di corrente e pertanto in alcuni casi rallentavano.

È evidente, comunque, che il flusso di acqua che parte dal Rockpile non può raggiungere l'esterno in una sola marea (circa 6 ore teoriche, che in realtà si riducono a 4 1/2 per effetto dello sfasamento); viceversa è stato appurato che entro due basse maree, intervallate da una alfa (18 ore teoriche, che si riducono a 16 1/2 per lo stesso motivo) questo è sicuramente avvenuto: infatti dopo tale periodo nessuno dei corpi galleggianti utilizzati per la prova era ancora all'interno della cavità. In conclusione, quindi, la velocità media di flusso, tenendo conto anche dell'inversione mareale, risulta essere sicuramente superiore a 4 metri/minuto.

Tenendo presente che la portata del fiume in ingresso era di circa 200 litri/secondo, in 16 ore e mezzo il volume d'acqua che si deve esser scaricato a mare risulta essere 11880 metri cubi e se lo suddividiamo in maniera costante lungo la superficie delle acque dal Rockpile all'ingresso (4400 m con larghezze medie di 15 m) otteniamo uno strato d'acqua di circa oltre 20 cm. Tale risultato è congruente con quanto misurato relativamente ai due primi strati superficiali meno salati non molto lontano dal Rockpile.

I rapporti idrodinamici tra i ne differenti livelli di acqua esistenti a valle del Rockpile risultano abbastanza complessi; in effetti direzioni di flusso e velocità variavano, a volte invertendosi da strato a strato.

Non è stato possibile effettuare osservazioni sistematiche di questi fenomeni per mancanza di tempo e per mancanza di strumenti idonei (mulinelli): lo strato superficiale, comunque è quello che per maggior tempo aveva una direzione di flusso verso l'esterno, con velocità sempre superiori a quelle degli strati inferiori. Tale differenza andava affievolendosi sia in durata che in velocità mano a mano che si discendeva dal Rockpile verso l'ingresso.

Il secondo strato ha velocità di flusso verso l'esterno sempre inferiori a quelle del primo strato, mentre per sufficientemente lunghi periodi all'inizio e fine di sauta della marea evidenziava un flusso inverso, mentre lo strato superficiale ancora fluiva verso valle o era fermo.

Lo strato più profondo, in tutte le occasioni in cui ci è stato possibile osservarne il comportamento idrodinamico è risultato esser fermo o in movimento coerente con lo strato superiore, ma molto più lento.

È evidente che i movimenti nei tre strati sono causati dal combinarsi di due differenti fattori; il costante fluire di 200 l/s di acqua dolce da monte e il montare e calare delle maree da valle.

Nel gioco combinato di questi due fattori si deve tenere

anche in conto lo sfasamento che la marea subisce lungo la grotta, sfasamento che è stato misurato sperimentalmente essere dell'ordine di circa 1 h ora e che quindi provoca condizioni opposte (marea crescente e calante) nello stesso istante in posizioni differenti della grotta.

Lo strato superficiale (quello meno salato e che per la maggior parte del tempo fluisce verso valle) è chiaramente quello più influenzato dalla componente "acqua dolce", mentre lo strato di mezzo (quello in cui sono massime le variazioni di conducibilità) è quello che consente lo spostamento di masse avanti ed indietro nella cavità in funzione delle maree, ma anche viene influenzato da parte della miscelazione delle acque dolci; lo strato più profondo, invece, risente solo ed in minima parte dell'effetto delle maree.

Pur non avendo dati sufficienti in proposito, possiamo ritenere che sia dovuto allo sfasamento di marea e al conseguente richiamo dallo strato superficiale di acqua dolce il fatto che nella fascia d'acqua di mezzo la conducibilità presenta una proporzionalità inversa alle maree.

V. PROVE DI EROSIONE CHIMICA

Durante la spedizione effettuata nel febbraio del 1990 furono sistemati sott'acqua alcuni ciottolotti di calcare (Rosso Ammonitico Veronese) a differenti profondità lungo il tratto principale della cavità dall'ingresso sino al Rockpile. Molti di essi sono andati perduti, soprattutto a causa delle violente piene conseguenza dei monsoni.

Nel febbraio 1991, comunque, i ciottolotti ancora in loco sono state prelevati e quindi controllati in laboratorio.

Dai dati disponibili (Tab. 3) si ricava che il massimo di dissoluzione ha caratterizzato in generale i campioni posizionati presso il Rockpile, e tra questi maggiormente quelli posti nello strato di acqua salata. Netamente minore erosione chimica hanno subito i campioni posti a metà strada (Fig. 1), mentre quelli sistemati non lontano dall'ingresso hanno evidenziato un aumento di peso connesso alla presenza di concrezionamento calcareo di origine biotica.

I risultati, pur non essendo sufficienti a definire in maniera puntuale le caratteristiche di sottosaturazione e di sovraturazione delle acque circolanti nel sistema hanno permesso di appurare che tali acque conservano un notevole potere aggressivo per oltre 3 km a valle del Rockpile, mentre solo negli ultimi 5-600 metri di grotta esse sono sicuramente sovraturate rispetto al carbonato di calcio, come l'abbondanza dei depositi biotici sta a

dimostrare.

Il fatto che il massimo di corrosione si sia verificato presso il Rockpile è abbastanza logico, dato che è proprio in questo punto che si inizia ad avere la miscelazione tra le acque dolci e quelle salate e pertanto massima risulta essere la corrosione per miscelazione. Il fatto che i ciottolotti posti a maggior profondità siano stati più corrosi è da mettere in relazione alla maggior salinità degli strati d'acqua più bassi.

Le acque del sistema si mantengono poi corrosive per molto tempo sia perché la miscelazione tra acqua dolce e salata avviene molto lentamente tra i tre livelli di acque, mentre il flusso della corrente, soprattutto dello strato superficiale dolce, è molto sostenuto, sia perché,

in vari punti a valle vi sono immissioni di altra acqua dolce da affluenti sotterranei. Solamente nella zona finale della cavità, ove praticamente gli apporti di acqua dolce divengono nulli, allora le caratteristiche chimiche dell'acqua nel condotto principale tendono a divenire uguali a quelle del mare, con sovrassaturazione rispetto al carbonato di calcio e conseguente possibilità di vita per gli organismi costruttori.

Il confronto tra i valori di corrosione misurati nel sistema di St. Paul (Tab.3) con quelli che caratterizzano l'ambiente superficiale delle aree carsiche tropicali (circa 180-300 t/km²/yr (CORBEL, 1959; TRUDGILL 1975), conferma l'elevato potere aggressivo risultante dalla miscelazione di acque dolci e acque salate.

N	Peso iniz. g	Peso fin. g	Diff. g	Superf. cm ²	Erosione chimica	
					g/cm ² /yr	t/km ² /yr
1A	37,9624	*				
1B	27,7964	*				
2A	23,3240	23,0343	0,2897	30,7944	0,0094076	940,76
2B	11,7368	11,5857	0,1511	21,8946	0,0069012	690,12
3A	23,1284	22,7891	0,3393	29,8662	0,0113607	1136,07
3B	15,0534	14,7828	0,2706	23,9694	0,0112894	1128,94
3C	9,760	9,4247	0,3353	19,6287	0,0170821	1708,21
3D	24,0681	23,5890	0,4791	30,7125	0,0155995	1559,95

* i due campioni risultavano coperti di depositi calcarei organogeni e pertanto il loro peso finale era nettamente maggiore di quello iniziale
I campioni 3A e 3B sono stati posizionati a -10 cm rispetto alla bassa marea, mentre i campioni 3C e 3D a -130 cm.

Tabella 3 : Erosione chimica misurata sui campioni di calcare lasciati nel sistema di St. Paul per 1 anno (Febbraio 1990-Febbraio 1991)

VI. CONSIDERAZIONI CONCLUSIVE

Dai dati a disposizione si possono ricavare già sin da ora alcuni importanti risultati sull'idrochimica e l'idrodinamica della grotta.

La cavità, dal punto di vista idrogeologico, può essere suddivisa in due distinte parti separate da loro dalla grande frana del Rockpile.

A monte vi è praticamente acqua dolce e l'effetto delle maree, che ancora si risente per alcune centinaia di metri, produce essenzialmente un tamponamento delle

acque dolci, con conseguente innalzamento del livello dell'acqua. Pertanto in questa parte della cavità sono attivi i normali meccanismi speleogenetici carsici.

Nella parte della grotta a valle del Rockpile, invece, la situazione cambia completamente con la formazione di tre differenti strati sovrapposti di acqua a chimismo ed idrodinamica differente; tale strati debbono il loro comportamento all'effetto incrociato delle maree e del flusso discendente costante di acqua dolce da monte del Rockpile.

La miscela tra i diversi tipi di acqua produce un

aumento di aggressività, particolarmente marcato nel secondo strato di acqua ove massima è la miscelazione, che si protrae per alcuni chilometri con la formazione di tutta una serie di morfologie ogivali e a *megascallops* lungo le pareti della galleria. Solamente molto vicino all'uscita in mare le acque cessano di essere aggressive e le modificazioni morfologiche in questa zona della cavità sono quindi maggiormente da imputarsi all'erosione dovuta al moto ondoso che ancora in queste zone fa sentire la sua influenza anche e soprattutto durante i periodi di tempesta.

In conclusione si può affermare che, pur nella loro limitatezza e preliminarità, le indagini idrogeologiche condotte nella Grotta di St. Paul sono state molto utili per chiarire l'idrochimica e l'idrodinamica della cavità, che sono risultate esser più complicate dei modelli che teoricamente si erano preparati; nel prossimo futuro sarà necessario procedere a nuove campagne sistematiche di acquisizioni dati se si vorrà arrivare alla modellizzazione quantitativa di questo sistema carsico.

VII. RINGRAZIAMENTI

Gli autori ringraziano il Department of Environmental and Natural Resources delle Filippine per la collaborazione e l'appoggio logistico prestati.

VIII. BIBLIOGRAFIA

- AA. Vv., 1982. *Geology and mineral resources of the Philippines*, B.R.G.M., Manila.
- CORBEL, J., 1958. Erosion en terrain calcaire. *Ann. Géogr.* 66 (366) :97-120.
- DE VIVO, A., PICCINI, L. & MOURET, C., 1990. "Macatingol" il Fiume che romba. *Speleologist*, 22 : 22-31.
- FEIR, R.B. (Director), 1991. *Tide and current tables, Philippines. Fort Bonifacio, Makati, Metro Manila*: 87-90.
- TRUDGILL, S.T., 1975. Measurements of erosional weight loss of rock tablets. *Brit. Geomorph. Res. Group Techn. Bull.*, 17 : 13-19.

Adresses des auteurs :

Paolo Forti, Léonardo Piccini & Guido Rossi
Istituto italiano di Speleologia
Via Zamboni 67
I-40127 BOLOGNA
ITALIE

Roberto Zorzin
Museo civico di Storia naturale
Lungadige Porta Vittoria 9
I-37100 VERONA
ITALIE